



INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE
MINAS GERAIS — *CAMPUS BAMBUÍ*

Sabrina Ferreira de Queiroz

**ASSINATURA GEOQUÍMICA E SUAS IMPLICAÇÕES PARA O MEIO
AMBIENTE: Bacia do rio São Francisco, região entre os municípios de Abaeté e Belo
Horizonte.**

Projeto Estruturante: Análise e Gestão da Paisagem.

Bambuí
2023

SABRINA FERREIRA DE QUEIROZ

**ASSINATURA GEOQUÍMICA E SUAS IMPLICAÇÕES PARA O MEIO
AMBIENTE: Bacia do rio São Francisco, região entre os municípios de Abaeté e Belo
Horizonte.**

Dissertação de conclusão de curso apresentado ao Curso de Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental (MPSTA) do Instituto Federal de Minas Gerais — Campus Bambuí para obtenção do título de mestra em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental.

Orientadora: Prof^ª. Ariana Cristina Santos Almeida

Coorientador: Prof^º. Dr. Eduardo Duarte Marques

Linha de pesquisa: Planejamento e Gestão Ambiental.

Grupo Estruturante: Análise e Gestão da Paisagem.

Catálogo na Fonte Biblioteca IFMG - Campus Bambuí

Q3a Queiroz, Sabrina Ferreira de.
Assinatura geoquímica e suas implicações para o meio ambiente: Bacia do rio São Francisco, região entre os municípios de Abaeté e Belo Horizonte. / Sabrina Ferreira de Queiroz. – Bambuí, 2023.
203 f.: il.; color.

Orientadora: Prof^a. Ariana Cristina Santos Almeida.
Dissertação (Mestrado) - Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG, Curso Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, 2023.

1. Background geoquímico. 2. Sedimento de corrente. 3. Elementos potencialmente tóxicos. I. Almeida, Ariana Cristina Santos. II. Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais – Campus Bambuí, MG. III. Título.

CDD 333.7072

Elaborada por Douglas Bernardes de Castro- CRB-6/2802



MINISTÉRIO DA EDUCAÇÃO
SECRETARIA DE EDUCAÇÃO PROFISSIONAL E TECNOLÓGICA
INSTITUTO FEDERAL DE EDUCAÇÃO, CIÊNCIA E TECNOLOGIA DE MINAS GERAIS
Campus Bambuí
Diretoria de Pesquisa, Inovação e Pós-Graduação
Seção de Pós-Graduação
Av. Professor Mário Werneck, 2590 - Bairro Bunitis - CEP 30875-180 - Belo Horizonte - MG
57.9451-6900 - www.ifmg.edu.br

PARECER Nº 6

FICHA DE APROVAÇÃO

Dissertação de Mestrado, intitulada "ASSINATURA GEOQUÍMICA E SUAS IMPLICAÇÕES PARA O MEIO AMBIENTE: Bacia do rio São Francisco, região entre os municípios de Abaeté e Belo Horizonte", de autoria da mestranda em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, **Sabrina Ferreira de Queiroz**, sob a orientação da prof. Dra. Ariana Cristina Santos Almeida, tendo como coorientador o prof. Dr. Eduardo Duarte Marques, aprovada pela Banca Examinadora de Defesa, em 24/05/2023, com a média de 87,0 pontos.

A análise das correções finais da dissertação sugeridas pela Banca Examinadora será feita pela equipe de orientadores.

Bambuí (MG), 24 de maio de 2023.



Documento assinado eletronicamente por **Eduardo Marques** registrado(a) civilmente como **Eduardo Duarte Marques**, Usuário Externo, em 25/05/2023, às 16:44, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Ariana Cristina Santos Almeida**, Professora, em 25/05/2023, às 17:15, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Emmanuel Vieira da Silva Filho**, Usuário Externo, em 25/05/2023, às 17:41, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Gustavo Augusto Lacorte**, Professor, em 29/05/2023, às 08:29, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



Documento assinado eletronicamente por **Sabrina** registrado(a) civilmente como **Sabrina Ferreira de Queiroz**, Usuário Externo, em 29/05/2023, às 08:51, conforme Decreto nº 10.543, de 13 de novembro de 2020.



A autenticidade do documento pode ser conferida no site <https://sei.ifmg.edu.br/consultadocs> informando o código verificador **1564036** e o código CRC **EED2CC32**.

RESUMO

Levantamentos geoquímicos multielementares (LGM) e o estabelecimento de concentrações de *background* geoquímico de elementos químicos em sedimentos, solos, rochas e água, a partir de técnicas avançadas de processamento de dados e análises estatísticas, constituem ferramentas importantes ao entendimento dos processos que controlam a dispersão e o comportamento de tais elementos. Tal procedimento possui notável relevância para estudos ambientais ligados à gestão territorial sustentável. A definição destes valores de *background* permite a confrontação com as legislações e os regulamentos, que estabelecem limites de concentração para elementos potencialmente tóxicos no meio ambiente, muitas vezes sem levar em conta a complexidade e a heterogeneidade da região estudada. O objetivo desta pesquisa é descrever a assinatura geoquímica a partir da definição do *background* geoquímico e da composição química dos sedimentos de corrente, contribuindo para o conhecimento acerca da distribuição e do comportamento dos elementos químicos, principalmente os potencialmente tóxicos na região entre os municípios de Abaeté e Belo Horizonte — identificando a influência dos grandes domínios geológicos e das ações antrópicas sobre tais elementos. Dados obtidos de projetos geoquímicos, executados pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM), foram submetidos a uma análise estatística robusta e métodos consolidados na literatura especializada, caracterizados por análises estatísticas: univariada e bivariada. Como resultado, foram obtidas informações geoespaciais (mapas de distribuição geoquímica atrelados a mapas de geologia e de uso e ocupação; mapas de fator de enriquecimento de metais e fator de contaminação) onde constatarem-se fortes evidências de contribuição geológica e possíveis, e pontuais, contaminações relacionadas à atividade humana. A determinação do *background* e a definição dos compartimentos geoquímicos revelaram forte similaridade com os domínios geológicos, mostrando que as associações geoquímicas são controladas pela geologia. Desta forma, considera-se essencial a definição de valores de referência com base em compartimentos geológicos e se reforça que utilizar valores de referência uniformes para grandes áreas é inadequado. Os valores de *background* obtidos permitem o monitoramento e o controle das concentrações anômalas de elementos potencialmente tóxicos, principalmente quando associadas à utilização de índices ambientais, auxiliando nas políticas ambientais e em estudos de impactos ambientais e sociais.

Palavras-chave: *Background* geoquímico. Sedimento de corrente. Elementos potencialmente tóxicos. Ciências Ambientais.

ABSTRACT

Multi-elementary geochemical surveys and the definition of background concentration values of the chemical elements in sediments, soils, rocks and water by advanced techniques of data processing and statistical analyses are important tools for the comprehension of the dispersion and behavior of these elements. Such procedures are crucial for environmental studies linked to sustainable territorial management. The definition of these concentration values allows the confrontation with those values pointed out by laws and regulations, highlighting the potentially toxic elements (PTE), which often do not take into account the complexity and the heterogeneity a given region. The aim of this research is to describe the geochemical signature of chemical elements in stream sediments in the region between the Abaeté and Belo Horizonte municipalities, identifying the influence of the geological domains and anthropogenic activities in the behavior of these elements. The geochemical data used were obtained from Geological Survey of Brazil (SGB/CPRM) stream sediments geochemical surveys and submitted to the robust statistical analysis, characterized by univariate and bivariate statistics. As results, geospatial information was generated (chemical elements distribution maps and environmental indexes maps), which presented strong evidences of the geological influence in the sediment samples as well as some punctual evidences of anthropogenic influences (farming, industries and urbanization influences). The determination of the background values and the geochemical compartments revealed strong similarity with the geological domains, showing control of the geology upon the chemical elements' behavior. Therefore, the definition of background concentration values is crucial consider the geological units as the base of those calculations (samples inside the geological unit), reinforcing that using only one background concentration value (i.e., the median value of the samples for the entire study region) for a given element is inappropriate. The obtained background concentration values for the study region allow the monitoring and the controlling of the anomalous concentration of the PTE, mainly in the using of the environmental indexes, assisting the environmental policies and environmental and social impacts studies.

Keywords: geochemical background; stream sediment; potentially toxic elements; environmental sciences.

LISTA DE FIGURAS

FIGURA 1 - DISTRIBUIÇÃO DAS RGINs SEGUNDO PARTICIPAÇÃO NO PIB – MINAS GERAIS – 2017.....	7
FIGURA 2 - FLUXOGRAMA DAS ETAPAS DO TRABALHO.....	16
FIGURA 3 - DISTRIBUIÇÃO AMOSTRAL DOS SEDIMENTOS DE CORRENTE.....	18
FIGURA 4 MAPA DE LOCALIZAÇÃO DA ÁREA DE ESTUDO.....	20
FIGURA 5 - DISTRIBUIÇÃO DAS RGINs SEGUNDO PARTICIPAÇÃO NO PIB – MINAS GERAIS – 2017.....	21
FIGURA 6- MAPA ESQUEMÁTICO MOSTRANDO A POSIÇÃO DAS FOLHAS ESTUDADAS NA ÁREA DE ESTUDO E SUA INSERÇÃO NO CONTEXTO GEOTECTÔNICO.....	27
FIGURA 7 - COMPARTIMENTAÇÃO TECTÔNICA: BACIA NEOPROTEROZÓICA E EMBASAMENTO.	31
FIGURA 8 - MAPA GEOLÓGICO SIMPLIFICADO.....	34
FIGURA 9 - BOXPLOTS APRESENTANDO A VARIABILIDADE DOS ELEMENTOS DENTRO DAS UNIDADES GEOLÓGICAS.	47
FIGURA 10 – MAPA DE DISTRIBUIÇÃO DO Fe (%) PELO MÉTODO MAD.	50
FIGURA 11 - BACKGROUND DO Cr (PPM) PELO MÉTODO MAD.	52
FIGURA 12 - BACKGROUND DO Cu (PPM) PELO MÉTODO MAD.	53
FIGURA 13 - DESTAQUE DAS ÁREAS DE INFLUÊNCIA AGRÍCOLA DO MAPA.....	54
FIGURA 14 – CORRELOGRAMA DE AFINIDADE GEOQUÍMICA DOS ELEMENTOS.....	56
FIGURA 15 - MAPA GEOQUÍMICO DE DEFINIÇÃO DE BACKGROUND (As e Ni (PPM)) COMPARAÇÃO ENTRE OS MÉTODOS, MAD, TIF E DADOS BRUTOS.	59
FIGURA 16 - MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA (BACKGROUND) DOS ELEMENTOS Co, Ni, Au e As PELO MÉTODO MAD.	61
FIGURA 17 - GRÁFICOS DA MÉDIA DOS Fe UTILIZANDO COMO REFERÊNCIA AS MEDIANAS POR UNIDADE GEOLÓGICA E MEDIANAS E UCC PARA ÁREA TOTAL PELOS NORMALIZADORES (Al, Fe + Mn e Ca + Mg) ..	63
FIGURA 18 - MAPAS DE FATOR DE ENRIQUECIMENTO PARA OS ELEMENTOS As e Mo, TENDO O Al COMO NORMALIZADOR.	66
FIGURA 19 - MAPAS DE FATOR DE CONTAMINAÇÃO PARA OS ELEMENTOS As e Zn.	69
FIGURA 20 - FIGURA FC DO As SOBREPOSTA A IMAGENS GOOGLE EARTH.	70
FIGURA 21- FIGURA FC DO Pb SOBREPOSTA A IMAGENS GOOGLE EARTH.....	70
FIGURA 22 - MAPAS DE ÍNDICE DE POLUIÇÃO (PLI) COM TRATAMENTO GLOBAL DOS DADOS E POR UNIDADE GEOLÓGICA.....	72
FIGURA 23 - MAPAS DE GRAU DE CONTAMINAÇÃO MODIFICADO (GCM) COM TRATAMENTO GLOBAL DOS DADOS E POR UNIDADE GEOLÓGICA.	74
FIGURA 24 - MAPAS DE GRAU DE RISCO ECOLÓGICO (RE) COM TRATAMENTO GLOBAL DOS DADOS E POR UNIDADE.	76

LISTA DE TABELAS

TABELA 1 - VALORES DE BACKGROUND EM AMOSTRAS DE ARGISSOLOS E ROCHAS, PARA OS ELEMENTOS Pb, Cu, Zn, Ni, Cr, Cd.	10
TABELA 2 - VALORES CONSIDERADOS NORMAIS PARA O TEOR DE Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb E Zn EM SOLOS NÃO POLUÍDOS, PROPOSTOS COMO VALORES DE BACKGROUND.....	11
TABELA 3 - LIMITES DE TOLERÂNCIA PARA OS ELEMENTOS Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb E Zn.	11
TABELA 4 - ESTATÍSTICA DESCRITIVA DAS AMOSTRAS DE SEDIMENTOS DO ALTO RIO DAS VELHAS, REGIÃO DO QF EM COMPARAÇÃO COM OS DADOS DA EUROPA, AUSTRÁLIA, PORTUGAL E ITÁLIA.	12
TABELA 5- LISTA DE VALORES ORIENTADORES PARA SOLOS E ÁGUA SUBTERRÂNEA (COPAM – CERH N°166/2011) CONFRONTADOS COM NÍVEIS DE CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL A SER DRAGADO DISPOSTOS EM ÁGUAS SOB JURISDIÇÃO NACIONAL (CONAMA N°454/2012).	14
TABELA 6 - RELAÇÃO DE ELEMENTOS QUE APRESENTARAM GRAU DE DETECÇÃO MENOR QUE 60%	43
TABELA 7 - SUMÁRIO ESTATÍSTICO DOS ELEMENTOS.	45
TABELA 8 - MATRIZ DE CORRELAÇÃO DE SPEARMAN PARA OS 53 ELEMENTOS A UMA SIGNIFICÂNCIA DE 0,05.	55
TABELA 9 - TABELA COMPARATIVA DOS VALORES DE BACKGROUND POR DIFERENTES MÉTODOS	57

SUMÁRIO

1. INTRODUÇÃO	1
1.1 Objetivos	3
2. REVISÃO DE LITERATURA	4
2.1 Métodos para definição do <i>background</i>	7
2.2 Elementos-traço e valores de referência	8
3. METODOLOGIA.....	16
3.1 Compilação dos dados geoquímicos	16
3.2 Apresentação dos métodos de coleta, preparação e análise das amostras	18
3.3 Caracterização da área de estudo.....	19
3.3.1 Localização	19
3.3.2 Aspectos Socioeconômicos	20
3.3.3 Clima.....	22
3.3.4 Hidrografia.....	23
3.3.5 Geomorfologia	24
3.3.6 Contexto geotectônico e estratigrafia	26
3.3.7 Compartimentação geológica	30
3.4 Processamento dos dados geoquímicos e análises estatísticas com utilização de técnicas uni e bvariadas	35
3.5 Determinação dos valores de <i>Background</i> geoquímico a partir de métodos modernos recomendados.....	36
3.6 Determinação dos índices ambientais	38
3.6.1 Fator de Enriquecimento	38
3.6.2 Fator de Contaminação	39
3.6.3 Índice de Poluição	40
3.6.4 Grau de Contaminação e Grau de Contaminação Modificado.	40
3.6.5 Risco Ecológico	41
3.7 Desenvolvimento de um SIG do projeto e cartografia geoquímica	42
4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.	43
4.1 Sumário estatístico.....	43
4.2 Estatística Bivariada	54
4.3 Cálculo do <i>background</i> por TIF e MAD e análise fractal	57
4.4 Índices ambientais.....	62
4.5 Produto técnico.....	77
5. CONCLUSÕES.....	78

REFERÊNCIAS.....	79
ANEXOS	92
APÊNDICE	124

1. INTRODUÇÃO

Levantamentos Geoquímicos Multielementares (LGM), aliados a técnicas avançadas de processamento de dados e análises estatísticas, constituem ferramentas importantes para o entendimento do meio físico e da sua relação com as alterações naturais e as geradas pelas ações antrópicas. Galuszka (2007a) cita a implicação destas alterações de forma importante nas áreas da Geologia, Toxicologia, Biologia e em outros campos, demonstrando a importância da definição de concentração geoquímica de elementos-traço e sua relevância para estudos ambientais ligados à gestão territorial sustentável.

Sedimentos de corrente possuem uma grande capacidade de concentrar elementos-traço, e, desta forma, levantamentos geoquímicos por esta matriz podem revelar a assinatura geológica de uma região (GASPARON *et al.*, 2002; SILVA *et al.*, 2003) e serem aplicados em estudos ambientais, identificando potenciais fontes de contribuição, sejam elas de poluição antropogênica ou de fontes naturais (geogênicas), conforme apresentado por diversos trabalhos (ALBANESE *et al.*, 2007; DARNLEY *et al.*, 1995; GALUSZKA, 2007; REIMANN & CARITAT, 2017, 2005; YUAN *et al.*, 2013).

No Brasil, trabalhos de grande abrangência com esse enfoque são escassos, sendo necessários trabalhos e estudos que estabeleçam concentrações de elementos-traço e definam valores de *background* que permitam a confrontação com as legislações e os regulamentos. Os levantamentos geoquímicos regionais sistemáticos por sedimentos de corrente, realizados pelo Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM) em todo território nacional; o levantamento geoquímico de sedimento, solo e água do Estado do Paraná, realizado pela MINEROPAR — hoje, Instituto Água e Terra (IAT); e os levantamentos sistemáticos realizados pelo Instituto Tecnológico Vale (ITV), principalmente na Região Norte do Brasil, mostram-se como os trabalhos mais relevantes no país para tal fim (MARQUES, 2010; LARIZZATTI *et al.*, 2014; PINHO *et al.*, 2017; VIGLIO E CUNHA, 2012, 2016; SALOMÃO, 2020; LITCH, 2018). Atualmente, o arcabouço legislativo vigente, que estabelece as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais, está estabelecido pelas seguintes Resoluções: CONAMA 454/12; CONAMA 430/11; CONAMA 396/08 — para materiais dragados em águas sob jurisdição nacional, para lançamentos de efluentes em corpos d'água e para águas subterrâneas, respectivamente. Essas diretrizes, muitas vezes, não levam em conta a complexidade e a heterogeneidade da região, de forma a garantir o gerenciamento e a conservação do meio ambiente em relação à qualidade ambiental do espaço natural e antrópico.

A área a ser abordada para a realização desta pesquisa, a bacia hidrográfica do São Francisco, em Minas Gerais, entre os municípios de Abaeté e Belo Horizonte, possui grande importância para o Estado, pois abrange a área de maior concentração populacional, conseqüentemente, a de importância econômica, social e ambiental, tendo como principais atividades humanas: a indústria, a mineração e a agropecuária. Além disso, é uma região particularmente relevante aos estudos geoquímicos, por estar inserida em uma das maiores províncias minerais do Brasil e do mundo. Outro fator relevante para a escolha desta área como objeto de estudo se dá pela abrangência dos dados geoquímicos de sedimentos obtidos por projetos de levantamento geoquímico de alta densidade do Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM, os quais possuem análises químicas realizadas por métodos robustos.

A coexistência de grandes concentrações humanas e da atividade econômica intensa quase sempre criam fortes conflitos relacionados ao uso dos recursos naturais e do espaço. É neste cenário de conflito de interesses que a disputa territorial tem se intensificado na região, sendo de grande interesse que se conheça com clareza a distribuição dos elementos químicos na bacia, pois, com isso, qualquer modificação ambiental que venha a ocorrer poderá ser avaliada com maior critério.

Por não se conhecer a distribuição dos elementos nesta região e qual a influência os grandes domínios geológicos exercem sobre ela, faz-se necessário a identificação das associações e dos processos geoquímicos, bem como a definição da distribuição espacial e concentrações de *background* para os elementos analisados, levando em consideração as compartimentações geoquímicas e/ou geológicas, assim como a correlação com o uso e a ocupação do solo.

A determinação dos valores de *background* geoquímico e de índices ambientais de elementos químicos em sedimentos de corrente, com o uso de ferramentas estatísticas robustas, principalmente para os Elementos Potencialmente Tóxicos (EPT's), é de suma importância, pois, a partir destas informações, pode-se balizar políticas públicas e estudos que permitam mitigar e/ou controlar potenciais riscos de contaminação e riscos à população da área de estudo. Com base nos resultados obtidos, serão apresentados os mapas geoquímicos dos elementos e os mapas de índices ambientais (Fator de Enriquecimento (FE), Fator de Contaminação (FC), Grau de Contaminação Modificado (GCm), Índice de Poluição (PLI) e Índice de Risco Ecológico potencial (RE)), visando identificar valores anômalos, definir a influência geogênica, antropogênica ou de ambos.

1.1 Objetivos

O objetivo desta pesquisa é investigar a assinatura geoquímica, através da definição do *background* geoquímico da região entre os municípios de Abaeté e Belo Horizonte, e a influência dos seus grandes domínios geológicos e atividades antropogênicas na composição química dos sedimentos de corrente.

Como objetivos específicos, têm-se:

- Tratar, estatisticamente, os resultados analíticos dos elementos químicos e realizar uma análise espacial dos elementos nocivos à saúde;
- Fazer o levantamento dos compartimentos geológicos presentes na área investigada e confrontá-los com os resultados analíticos;
- Gerar mapas de definição do *background* e de índices ambientais relevantes (fator de enriquecimento, fator de contaminação, grau de contaminação modificado, índice de poluição e índice de risco ecológico potencial).

2. REVISÃO DE LITERATURA

A revisão de literatura ocorreu de forma a possibilitar um embasamento teórico sobre o tema abordado e a área do projeto. Portanto, esta revisão foi efetivada a partir da seleção de trabalhos e estudos publicados sobre assinaturas geoquímicas dos sedimentos de corrente, bem como da definição do *background* geoquímico e de sua relação com a heterogeneidade espaço temporal. Além disso, será apresentada a importância da região de desenvolvimento deste trabalho na questão socioeconômica do Estado de Minas Gerais e do Brasil.

Em meados do século XX, o termo “*background* geoquímico” foi usado para diferenciar a abundância de elementos nas formações rochosas mineralizadas e não-mineralizadas (HAWKES & WEBB, 1962). A partir daí, o termo ganhou espaço, sendo utilizado de forma abrangente nas Ciências Ambientais como valores de concentração de elementos influenciados por ações antrópicas (GOUGH, 1993), ou por concentração anômala de um elemento em diversos materiais, tais como: rochas, solos, plantas e água (PLUMLEE, 1999). Matschullat *et al.* (2000a) definem o termo como uma medida relativa que distingue as concentrações naturais de um dado elemento e as concentrações resultantes de atividades antrópicas.

Com o objetivo de estimular o levantamento geoquímico global de forma padronizada e acabar com os problemas de resultados obtidos por diversas metodologias, na década de 90 foi utilizada a metodologia estabelecida por Darnley *et al.* (1995), que adotava o termo: “*baseline* geoquímico”.

Este termo seria deixado para trás, pois, muitos autores (GAŁUSZKA & MIGASZEWSKI, 2012; REIMANN *et al.*, 2005; REIMANN & CARITAT, 2005; REIMANN & GARRETT, 2005) entendiam que o uso do termo, “*baseline* geoquímico”, dava uma impressão incorreta da existência de um limite único de concentração, sem levar em consideração a variação dos valores por região.

O desenvolvimento sustentável ganha um aliado importante através do mapeamento geoquímico multipropósito, onde, segundo Licht (2001), essa ferramenta permite o maior uso da informação, possibilitando aplicações mais amplas, abrangentes e de maior significado para a sociedade, sendo de grande importância na investigação e na mitigação de “problemas”. As aplicações multipropósitos de dados geoquímicos abrangem estudos geológicos tradicionais (CARRANZA, 2008), zoneamentos agrícolas (FERRAZ *et al.*, 2019) e o campo das Ciências Ambientais (GAŁUSZKA, 2007; GAŁUSZKA & MIGASZEWSKI, 2012; REIMANN & CARITAT, 2005; REIMANN & GARRETT, 2005; YUAN *et al.*, 2013).

O termo “faixa de referência geoquímica” ou “valores de referência” também são usados em substituição ao termo “*background* geoquímico”, como no estudo de Nieto e Custodio (2005). Observa-se que, independentemente do termo adotado, o estabelecimento de valores de referência para condições naturais é importante e fornece ferramentas de regulação e monitoramento das atividades antrópicas.

Os resultados de diversos trabalhos e estudos distribuídos pelo mundo, com abrangências local, regional ou nacional, demonstraram uma abordagem moderna de exploração geoquímica e a determinação dos valores de referência. Como pode ser visto em trabalhos desenvolvidos na România (MAFTEI *et al.*, 2018), na França (LEDIEU *et al.*, 2020), na Polônia (NAWROT *et al.*, 2020), na Índia (SARKAR *et al.*, 2017), na Tunísia (AYARI *et al.*, 2021), na Sérvia (ŠTRBAC *et al.*, 2018) e no Brasil (MARQUES, 2010; LARIZZATTI, J. H. *et al.*, 2014; PINHO *et al.*, 2017; LARIZZATTI *et al.*, 2018; SAHOO *et al.*, 2020).

Estes trabalhos mencionados anteriormente, além de muitos outros, demonstram que a transferência e o armazenamento de elementos químicos em partículas são controlados por processos físicos, químicos e biológicos, gerando concentrações de elementos nocivos à saúde humana e ao meio ambiente. Tal característica permite apontar e correlacionar as contaminações com elementos-traço desenvolvidos por três associações geoquímicas principais: a) relacionadas a fontes litológicas; b) tectônicas e c) antropogênicas (REIMANN *et al.*, 2014 a, b).

É possível observar, em alguns estudos, as três associações (a, b e c), como no caso da contaminação e distribuição de fontes de elementos-traço (Ag, As, Cd, Cr, Cu, Hg, Ni, Pb, Sb, V e Zn) na Tunísia (AYARI *et al.*, 2021). Aos mesmos moldes do caso da Tunísia, nos resultados obtidos do projeto GEMAS (REIMANN *et al.*, 2014 a, b), foi revelado que os solos de algumas cidades europeias, como Londres, Paris, Roterdã, e seus entornos, apresentam elevadas concentrações de Hg. Essas acentuadas concentrações de Hg, em solos de cidades europeias, ocorrem em função de múltiplas fontes e condicionantes.

Em outros trabalhos, pode ser observada uma única associação, a fonte antropogênica (c) com concentrações dos metais pesados, definida por Zn, Cu, Pb, Cd, Ni, Cr e Fe, e encontrada em amostras de sedimentos ao longo do córrego Strzyza no norte da Polônia, caracterizadas por intensa urbanização em suas bacias (NAWROT *et al.*, 2020).

Associações litológicas e tectônicas (a e b) que ocorrem na sub-bacia de Parauapebas, Amazônia brasileira, demonstram que os padrões de distribuição dos elementos variaram significativamente entre os três principais domínios geológicos, onde os dados indicam uma forte impressão da configuração geológica local nas associações geoquímicas e apontam para

uma origem geogênica dominante para os elementos analisados (SAHOO *et al.*, 2020). Essa associação, também, é apresentada no Projeto Vazante-Paracatu, executado pelo SGB-CPRM, que mostra contextos geotectônicos distintos e como as características das unidades geológicas influenciam diretamente no comportamento geoquímico dos elementos analisados (PINHO *et al.*, 2017).

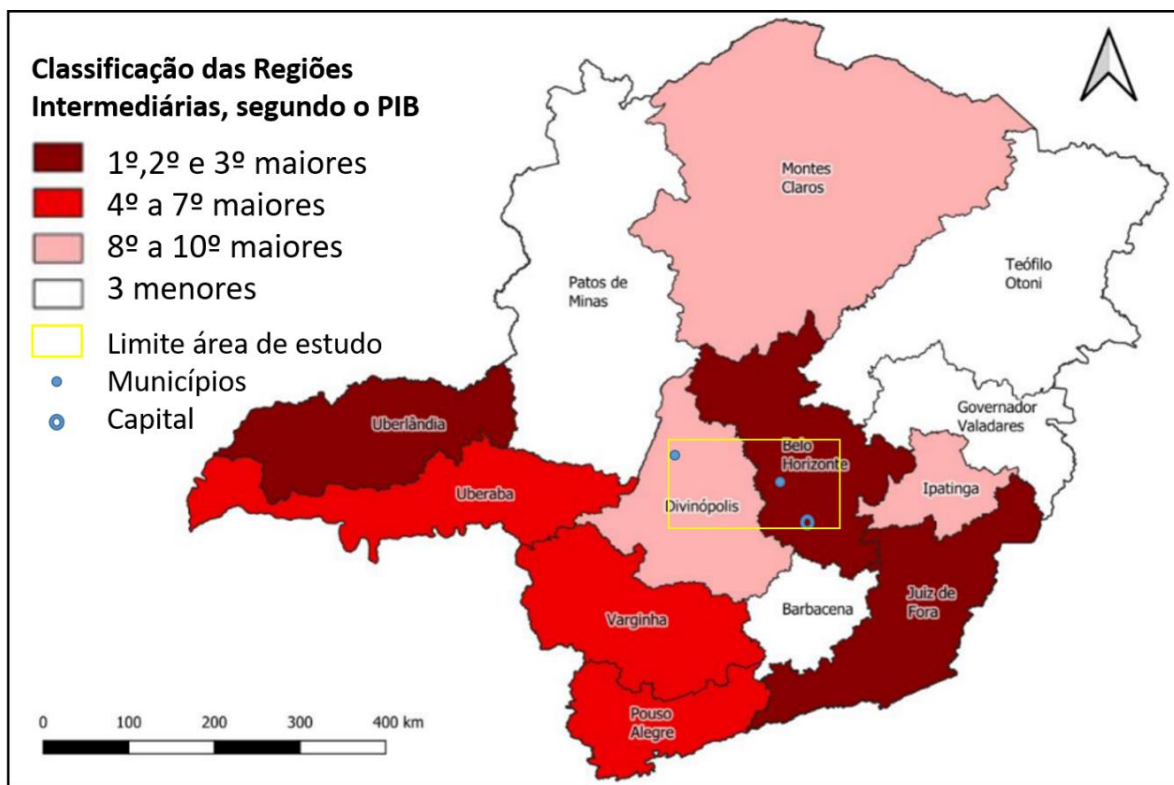
A associação exclusivamente tectônica (b) foi descrita por Georgopoulos *et al.* (2018) como uma contaminação por Cr na região sudeste da Grécia, ocorrida pela degaseificação geotérmica e alteração fumarólica, que resultou no severo intemperismo da rocha mãe ultramáfica serpentinizada e em um grande aumento da mobilidade de oligoelementos.

Acredita-se que o levantamento do *background* geoquímico e a associação dos elementos químicos são respostas de suas mobilidades nos processos geológicos, e que as anomalias podem estar relacionadas a um controle geogênico, que pode ou não ser acentuado pela ação do homem.

Em termos socioeconômicos, a economia mineira, em 2017, foi responsável pelo valor de produção de R\$ 980,82 bilhões, sendo que o setor agropecuário teve uma contribuição de 5,7% (R\$ 28,71 bilhões); a indústria, 25,4% (R\$ 128,38 bilhões); e os serviços, 68,9% (R\$ 347,81 bilhões) (FJP, 2019). Dos 853 municípios do estado, dois municípios concentraram 21,38% do PIB (Belo Horizonte e Uberlândia), sendo Belo Horizonte responsável por 15,44% (FJP, 2019).

A região do trabalho abrange Belo Horizonte e também alguns municípios que fazem parte dos 20 municípios de maior PIB em 2017 (**Figura 1**), tais como: Contagem, Betim e Sete Lagoas. Municípios estes pertencentes à Região Geográfica Intermediária (RGINT) de Belo Horizonte, e que também possuem parte da área de estudo pertencente à RGINT de Divinópolis, sendo que a RGINT de Belo Horizonte representa uma grande participação na produção industrial do estado. Ademais, dos 20 municípios de maior participação, nove pertencem a essa região, e a RGINT de Divinópolis produziu 5,73% do PIB mineiro em 2017, tendo a agropecuária como destaque com 8,31% de contribuição (FJP, 2019).

Figura 1: Distribuição das RGINS, segundo participação no PIB – Minas Gerais – 2017.



Fonte: Mapa 14 da Fundação João Pinheiro; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (FJP, 2019).

Desta forma, conhecer a regionalidade e as prováveis fontes de contaminação de uma região de extrema importância econômica é um fator importante a ser considerado nas legislações ambientais que se propõem a estabelecer o limiar ou os níveis de qualidade ambiental para elementos-traço, preservando e fomentando um desenvolvimento sustentável.

2.1 Métodos para definição do *background*

Os métodos mais utilizados em estudos, a partir da determinação de *backgrounds* geoquímicos, são: o método direto (geoquímico) e o indireto (estatístico), conforme discutido por Galuszka (2007b).

O método direto, ou método geoquímico, baseia-se na análise de amostras isentas de interferência antrópica (CROMMENTUIJN *et al.*, 2000; BAIZE & STERCKEMAN, 2001; HORCKMANS *et al.*, 2005), onde os valores de *background* são determinados pelos valores médios da concentração de metais de uma área ou depósito que não sofreu influência de ações antropogênicas e requer um conhecimento profundo sobre o comportamento dos elementos, entendimento das condições paleoambientais e sedimentológicas (COSTA, 2007).

O método indireto, ou método estatístico, ocorre através de métodos exploratórios e do desenvolvimento de métodos semiquantitativos de rápida execução e custos mais baixos. Tal método, segundo Frizzo *et al.* (2007), extrai parcialmente os elementos, devendo apresentar suas características essenciais, permitindo a reprodutibilidade dos resultados, mesmo que perca em acurácia ou exatidão.

Dessa forma, esse método utiliza-se de amostras estatísticas finitas, as quais constituem toda ou uma população representativa da área de estudo.

Esses dados são tratados através de técnicas estatísticas realizadas por *softwares* computacionais, onde a definição do *background* geoquímico pode ser feita através de diversas técnicas, tais como: análises de regressão linear, testes de normalidade, *boxplots*, análise fractal (LI *et al.*, 2003).

2.2 Elementos-traço e valores de referência

A presença e a liberação de elementos-traço no ambiente têm sido frequentemente associadas à contaminação e aos efeitos tóxicos sobre diferentes comunidades bióticas presentes nos ecossistemas naturais, mesmo alguns desses elementos sendo macros nutrientes necessários aos seres vivos (BRUNO, 2005). Em concentrações elevadas, são extremamente nocivos, causando impactos negativos no ecossistema e na saúde humana (RIBEIRO FILHO *et al.*, 2001).

Quando se fala dos elementos-traço presentes nos sedimentos, Poletto e Merten (2008) relatam que os sedimentos são os maiores poluidores da água — e, também, catalisadores, carreadores e agentes fixadores de outros materiais poluidores.

De acordo com Russel *et al.* (2001), os sedimentos por si só degradam a qualidade da água, causando também impactos relevantes à biota aquática. Mesmo assim, a influência dos sedimentos na qualidade da água ainda não é efetivamente considerada em muitos países, inclusive no Brasil (OTTESEN *et al.*, 1989).

A determinação do *background* geoquímico para determinação de valores naturais de elementos-traço em diferentes amostras (sejam elas em sedimentos de corrente, solo e/ou água) nos estudos ambientais, tem se tornado essencial à preservação da vida.

Estudos em ambientes aquáticos sugerem que as concentrações dos elementos-traço são associadas frequentemente à litologia local (BRUNO, 2005), e, em solos, a quantidade significativa de elementos-traço, em maior ou menor grau, reflete os teores do material de origem (SUMNER, 1999). Em sedimentos, a concentração destes elementos varia em função

da razão de deposição, sedimentação, natureza e, também, em relação ao tamanho das partículas e presença (ou não) de matéria orgânica (JESUS *et al.*, 2004).

Para se entender a matriz utilizada nesse estudo, é importante entender o conceito de sedimento. Horowitz (1985) define essa matriz geológica como: “partículas derivadas de rochas ou materiais biológicos que foram transportados por um material fluido ou sólido suspenso ou assentado na água”. Sedimentos são constituídos de material de granulometria fina a média (argila, silte e areia), material esse que representa a composição média dos pontos de erosão da bacia hidrográfica a montante do local de amostragem, e normalmente apresenta alta heterogeneidade composicional em função da geologia, terreno, condições climáticas e mudanças no uso e cobertura da terra da bacia hidrográfica a montante (SALOMÃO, 2020).

Salomão (2020) também destaca a importância do tamanho das partículas para estudos geoquímicos, sejam elas orgânicas ou inorgânicas (minerais), que compõem as amostras de solos e sedimentos a serem analisados — estas são de fundamental importância para a interpretação de processos geoquímicos. Frações consideradas “frações naturais”, ou seja, < 2,0 mm, são usualmente utilizadas em estudos ambientais (UNDA-CALVO *et al.*, 2019).

Segundo Soares (2002), os sedimentos contaminados são considerados mundialmente como os contaminantes que mais contribuem para a degradação dos ecossistemas aquáticos, e, portanto, um problema eminente a ser resolvido para a preservação dos recursos hídricos.

Ambientes tropicais proporcionam maior possibilidade de dispersão dos elementos químicos, embora isso dependa de sua mobilidade química e da natureza do ambiente local (KABATA-PENDIAS & PENDIAS, 2001; PLANT *et al.*, 2000). Dos fatores que governam a mobilidade dos elementos em solução, talvez o Potencial Hidrogeniônico (pH) e o Potencial de Oxirredução (Eh) sejam os mais importantes. A química de muitos elementos no ambiente superficial pode ser avaliada por meio de diagramas de Pourbaix (Eh x pH, cf. TAKENO, 2005)

A dispersão superficial dos elementos depende de sua mobilidade ou capacidade de se mover. Um elemento pode ser extremamente móvel em um ambiente, bem como ser imóvel em outros. Isso dependerá de certas características do elemento em conjunto com condições físico-químicas do ambiente, neste caso, o pH e o Eh, como mostram Reimann & Caritat (1998).

No Brasil, o Ministério do Meio Ambiente, através da Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente — *CONAMA N.º 344, de 25 de março de 2004*, revogada e substituída pela Resolução do Conselho Nacional do Meio Ambiente — *CONAMA N.º 454 de 01 de novembro de 2012*, estabeleceu diretrizes gerais e procedimentos mínimos para a avaliação do material a ser dragado e o gerenciamento da sua disposição, baseados em referências internacionais,

principalmente as canadenses e americanas, sem a adoção dos valores de referência locais que permitem o monitoramento geoambiental e a fiscalização.

Conforme já exposto, poucos estudos têm sido desenvolvidos com o objetivo de investigar e definir as contribuições de diferentes fontes de liberação de elementos-traço nos ecossistemas em território brasileiro, sejam elas naturais ou antrópicas. Dentre os trabalhos existentes, destacam-se os seguintes estudos: Robaina *et al.* (2002); Fadigas *et al.* (2006); Costa (2007); Vicq (2015); e Salomão (2020).

Robaina *et al.* (2002) estabeleceram valores de *background* para elementos-traço na região do vale do Rio dos Sinos (**Tabela 1**). A partir desses resultados, foram identificadas concentrações excessivas de elementos-traço em alguns tributários, principalmente em relação aos elementos Cr, Zn, Cu e Pb — o que permitiu a fiscalização, o controle e a recuperação da região.

Tabela 1: Valores de *background* em amostras de argissolos e rochas, para os elementos Pb, Cu, Zn, Ni, Cr, Cd.

CONCENTRAÇÃO (ppm)			
ELEMENTOS	ROCHAS SEDIMENTARES	ARGISSOLOS	ROCHAS VULCÂNICAS
Pb	36,08	51,81	10,00
Cu	31,92	33,50	107,36
Zn	77,65	81,32	116,52
Ni	45,79	49,29	128,00
Cr	74,17	81,20	154,04
Cd	0,54	0,54	

Fonte: Robaina *et al.*, 2002.

Para os autores, o estabelecimento dos valores de *background* para os elementos Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn, pode ser utilizado em avaliações preliminares de áreas com suspeita de poluição ou com uso agrícola, cujos solos possuam características similares às dos solos estudados em questão. Alguns solos brasileiros têm propriedades específicas, gerando naturalmente concentrações de determinados elementos-traço mais elevadas, sem ser prejudiciais.

Fadigas *et al.* (2006) propuseram valores de *background* para alguns elementos-traço que representassem os principais solos brasileiros, através de suas características físicas, químicas e mineralógicas, as quais influenciam os valores de *background*.

Foram identificados por Fadigas *et al.* (2006), sete grupos (G1 a G7) de amostras das quais obtiveram as concentrações correspondentes ao quartil superior dos dados (75%): concentrações essas propostas como valores de *background* (**Tabela 2**); e os limites de tolerância estabelecidos para os elementos Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb, Zn. (**Tabela 3**).

Tabela 2: Valores considerados normais para o teor de Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn, em solos não poluídos, propostos como valores de *background*.

ELEMENTOS							
Concentração no solo (mg/kg)							
GRUPOS	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
1	55	29	35	119	79	1	19
2	48	10	18	19	44	1	25
3	65	4	25	16	23	2	16
4	35	10	17	12	35	1	18
5	23	4	7	6	12	0	22
6	43	2	12	2	12	0	3
7	19	2	5	3	6	0	40
QSm²	41	8	17	25	30	1	20

Fonte: Fadigas *et al.*, 2006.

- 1) Concentração considerada normal para os solos pertencentes a cada grupo e que corresponde ao valor do quartil superior (75%) da distribuição de frequência dos dados amostrais, em cada grupo;
- 2) Quartil superior médio entre os grupos.

Tabela 3: Limites de tolerância para os elementos Cd, Co, Cr, Cu, Ni, Pb e Zn.

ELEMENTOS							
Concentração no solo (mg/kg)							
GRUPOS	Cr	Co	Ni	Cu	Zn	Cd	Pb
1	114	44	92	283	149	2	35
2	94	34	45	41	92	2	66
3	131	12	46	48	42	4	31
4	81	21	43	41	65	2	60
5	61	9	21	11	24	1	84
6	53	3	19	2	14	1	4
7	41	8	10	5	13	1	154

Fonte: Fadigas *et al.*, 2006.

Vicq (2015) focou seu trabalho em sedimentos de corrente da Bacia Alto Rio das Velhas, no Quadrilátero Ferrífero, por ser uma região com imenso patrimônio geoambiental e

constituir uma das áreas de maior concentração populacional do Estado, bem como de grande importância econômica.

Comparando-se os resultados de seu trabalho com os estudos recentes realizados na Europa, na Austrália, em Portugal e na Itália, foi verificado que os sedimentos analisados apresentaram teores medianos de Fe, Cd, Co, Cr, Mn e Ni significativamente maiores (**Tabela 4**), demonstrando um relativo enriquecimento, que é resultado da presença de anomalias geogênicas associadas à disponibilização destes metais através da atividade de mineração.

Tabela 4: Estatística descritiva das amostras de sedimentos da Bacia Alto Rio das Velhas, Região do QF, em comparação com os dados da Europa, da Austrália, de Portugal e da Itália.

Elem	Unid	Mín	Máx	Médi a	Media na	Q1	Q3	EUR *	AUS* *	Port.* **	Itália ****
Al	%	0,17	8,2	2,52	1,9	1,0 2	3,8	5,5	1,5	1,6	1,5
Ca	%	$7,6 \times 10^{-4}$	1,82	0,14	0,07	0,0 4	0,15	1,7	0,3	0,2	6,4
Fe	%	1,04	62,2	12,9	10,4	5,4	16,6	2	2,3	2,5	2,1
K	%	$2,1 \times 10^{-4}$	0,57	0,05	0,03	0,0 2	0,06	1,7	0,2	0,1	0,3
Mg	%	$1,3 \times 10^{-4}$	1,3	0,11	0,07	0,0 3	0,12	0,7	0,3	0,4	0,6
Ti	%	$2,4 \times 10^{-4}$	0,31	0,05	0,03	0,0 2	0,07	0,4	n.d.	n.d.	0,02
As	mg.kg ⁻¹	1,6	1691	32,3	1,6	1,6	20,6	6	2,1	9	5,7
Cd	mg.kg ⁻¹	0,4	14,7	1,13	0,4	0,4	1,02	0,28	0,05	n.d.	0,2
Co	mg.kg ⁻¹	1,05	105	17,1	13,8	6,5	24,7	8	8,6	9	10,5
Cr	mg.kg ⁻¹	6,48	572	115	92,8	41, 7	151, 3	21	29,4	23	20
Cu	mg.kg ⁻¹	0,30	233,5	27,7	22,3	12, 7	37,9	14	16,5	22	30
Mn	mg.kg ⁻¹	41	1005 3	1317	756	305	1771	452	387	411	811
Ni	mg.kg ⁻¹	1,15	156,7	36,3	30,5	11, 2	56,9	16	13,8	19	21
Pb	mg.kg ⁻¹	0,4	70,2	22,5	20,2	14, 6	28,4	14	10,5	19	22
Zn	mg.kg ⁻¹	18,6	181,2	53,8	48,7	38, 4	63,1	60	37,3	74	71

Fonte: Vicq (2015).

Legenda: *Todos os dados da Europa, da Austrália, de Portugal e da Itália, referem-se aos valores da mediana. Q1: 1º quartil; Q3: 3º quartil. EUR*: Dados do *European Stream Sediment Survey* (SALMINEN *et al.*, 2005), com Al, Ca, Mg, K, Ti, Cd e Co, analisados por WD-XRF. AUS**: Dados do *Australian National Geochemical Survey*, com todos os elementos obtidos na fração < 75 µm, (água régia) (CARITAT & COOPER, 2011). Port.***: Dados do *Portugal Low-density geochemical mapping* (FERREIRA *et al.*, 2001). Itália****: Dados da Região da Campanha (ALBANESE *et al.*, 2007).

Ainda, segundo Vicq (2015), a alta densidade amostral permitiu constatar o controle da litologia na geoquímica dos sedimentos, e proporcionou ainda o estabelecimento de um padrão de comportamento bem definido dos elementos para cada tipo de rocha, permitindo a detecção de anomalias ocorridas em função da interferência antrópica.

Salomão (2020) realizou um trabalho de grande relevância envolvendo o sedimento de corrente, no qual apresentou o levantamento e a definição de *background* geoquímico da Bacia do Rio Itacaiúnas, no estado do Pará. Tal estudo concluiu que, mesmo a região tendo passado por mudanças significativas no uso e na cobertura da terra nas últimas décadas, a geoquímica dos sedimentos de corrente e os resultados obtidos indicam que a área é fortemente influenciada pelo ambiente geológico natural.

Em Minas Gerais, considerando a necessidade de se estabelecer valores de referência da qualidade dos solos para o estado, bem como estabelecer as diretrizes (**Tabela 5**), os procedimentos para a proteção da qualidade do solo e o gerenciamento ambiental de áreas contaminadas, foi, então, realizado um inventário de áreas contaminadas a partir do Programa Estadual de Gestão de Áreas Contaminadas. Como balizador deste gerenciamento, foram consideradas áreas com potencial de contaminação aquelas em que as concentrações das substâncias ou compostos químicos de interesse estivessem acima dos valores de investigação estabelecidos pela Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH N.º 166/2011, indicando a existência de potencial risco à saúde humana e ao meio ambiente (FEAM, 2021).

No ano seguinte, através da Resolução CONAMA N.º 454/2012, estabeleceram-se as diretrizes gerais e os procedimentos referenciais para o gerenciamento do material a ser dragado em águas sob jurisdição nacional, baseados no guia de qualidade de sedimentos do Canadá.

Tabela 5: Lista de valores orientadores para solos e água subterrânea (COPAM – CERH N.º 166/2011), confrontados com os níveis de classificação do material a ser dragado e dispostos em águas sob jurisdição nacional (CONAMA N.º 454/2012).

COPAM – CERH N.º 166/2011							CONAMA N.º 454/2012					
Substâncias (Inorgânicos)	Valor de						Substâncias (Metais e Semi metais [mg.kg ⁻¹])	NÍVEIS DE CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL A SER DRAGADO (em unidade de material seco)				
	Solo (mg.kg ⁻¹ de peso seco) ⁽³⁾					Água Subterrânea (µg.L ⁻¹) ⁽¹⁾						Água doce
	Referência de qualidade	Prevenção ⁽¹⁾	Investigação ⁽¹⁾			Investigação		Nível 1	Nível 2	Nível 1	Nível 2	
			Agrícola	Residencial	Industrial							
Alumínio ⁽⁵⁾	-	-	-	-	-	3500	-	-	-	-	-	-
Antimônio ⁽⁴⁾	0,5	2	5	10	25	5	-	-	-	-	-	-
Arsênio ⁽⁴⁾	8	15	35	55	150	10	Arsênio (As)	5,9 ¹	17 ¹	4	70 ²	
Bário ⁽⁴⁾	93	150	300	500	750	700	-	-	-	-	-	-
Boro	11,5	-	-	-	-	500	-	-	-	-	-	-
Cádmio ⁽⁴⁾	< 0,4	1,3	3	8	20	5	Cádmio (Cd)	0,6 ¹	3,5 ¹	1,2 ²	4	7,2
Chumbo ⁽⁴⁾	19,5	72	180	300	900	10	Chumbo (Pb)	35 ¹	91,3 ¹	46,7 ²	218 ²	
Cobalto	6	25	35	65	90	5	-	-	-	-	-	-
Cobre ⁽⁴⁾	49	60	200	400	600	2.000	Cobre (Cu)	35,7 ¹	197 ¹	34 ²	270 ²	
Cromo ⁽²⁾	75	75	150	300	400	50	Cromo (Cr)	37,3 ¹	90 ¹	81 ²	370 ²	
Ferro ⁽⁵⁾	-	-	-	-	-	2450	-	-	-	-	-	-
Manganês ⁽⁵⁾	-	-	-	-	-	400	-	-	-	-	-	-
Merúrio ⁽⁴⁾	0,05	0,5	12	36	70	1	Merúrio (Hg)	0,17 ¹	0,486 ¹	4	5	0,3 1,0
Molibdênio	< 0,9	30	50	100	120	70	-	-	-	-	-	-
Níquel	21,5	30	70	100	130	20	Níquel (Ni)	1	1	20,9 ²	51,6 ²	18 35,9
Nitrato (como N) ⁽⁴⁾	-	-	-	-	-	10.000	-	-	-	-	-	-
Prata	< 0,45	2	25	50	100	50	-	-	-	-	-	-
Selênio ⁽⁴⁾	0,5	5	-	-	-	10	-	-	-	-	-	-
Vanádio	129	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zinco ⁽⁵⁾	46,5	300	450	1000	2000	1050	Zinco (Zn)	123 ¹	315 ¹	150 ²	410 ²	

Fonte: Tabela modificada com base em CONAMA, 2012. Disponível em:

<http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=667>. Acesso em: 05 jun.

2022. E em COPAM, 2011. Disponível em: <<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414>>.

Acesso em: 05 jun. 2022.

Para a tabela de dados, COPAM/CERH N.º 02/2010:

(1) Os Valores de Prevenção e Investigação são os estabelecidos na Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH N.º 02, de 08 de setembro de 2010;

(2) Em função da concentração de cromo obtida, após análise estatística, ser superior ao VP estabelecido pela Resolução CONAMA 420/2009, adotou-se para o VRQ o valor de VP dessa Resolução;

(3) Procedimentos analíticos para digestão ácida de amostras de solos para determinação de espécies metálicas por técnicas espectrométricas devem seguir as recomendações dos métodos 3050b (exceto para o elemento mercúrio) ou 3051 da U.S EPA - SW-846, ou outro procedimento equivalente;

(4) Valores máximos permitidos oriundos da Portaria N.º 518/2004 do MS (Tabela N.º 3), com base em risco à saúde humana;

(5) Estes valores são diferentes da Tabela N.º 5 da Portaria N.º 518 do MS, pois foram calculados com base em risco à saúde humana, de acordo com o escopo desta resolução.

Para a tabela de dados, CONAMA N.º 454/2012:

Os valores orientadores adotados na Tabela III têm como referência as seguintes publicações oficiais canadenses, norte-americanas e europeias:

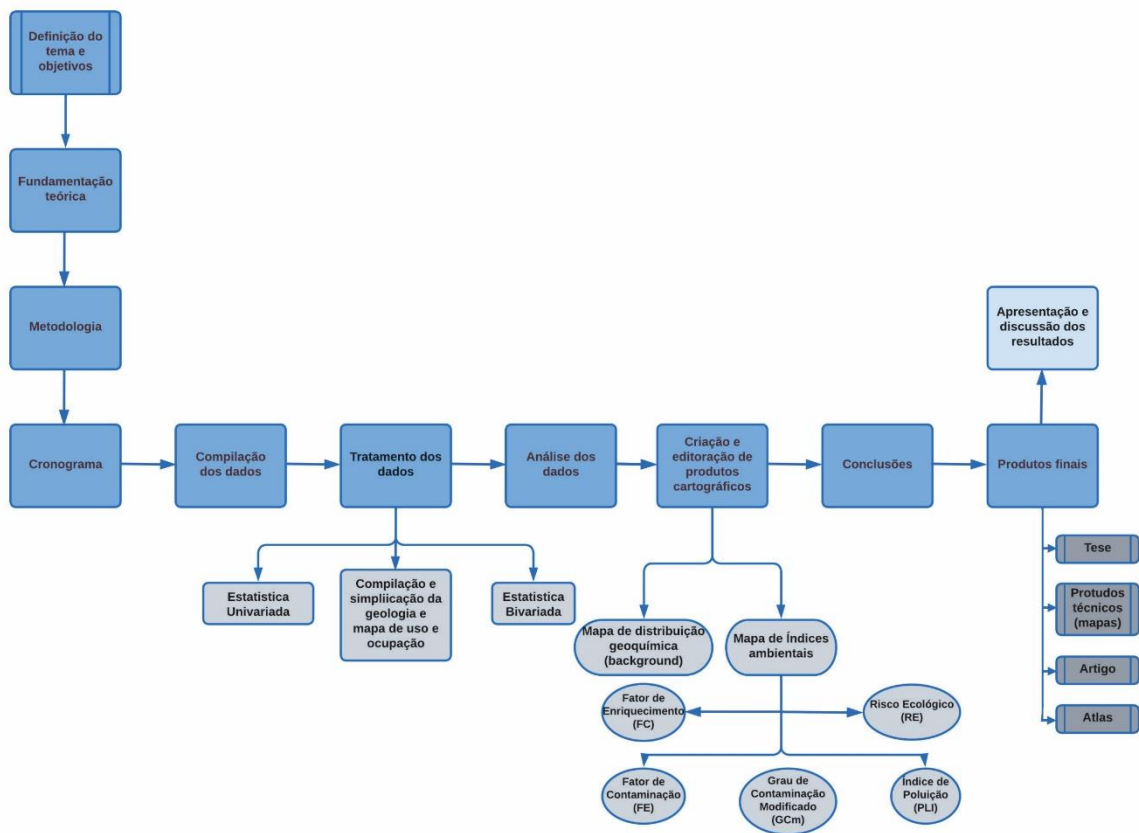
(1) *Environmental Canada. Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Canadian Environmental Quality Guidelines - Summary Tables*. Atualizado em 2002;

(2) Long, E. R.; MacDonald, D. D.; Smith, S. L. & Calder F. D. (1995). Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management* 19 (1): 81-97.

3. METODOLOGIA

Inicialmente, será apresentado um fluxograma (**Figura 2**) para representar esquematicamente as etapas, as sequências, o fluxo de trabalho e os resultados obtidos a partir do desenvolvimento dessa dissertação.

Figura 2: Fluxograma das etapas do trabalho.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

3.1 Compilação dos dados geoquímicos

Os dados geoquímicos de sedimentos de corrente utilizados, conforme Mapa de Distribuição de Amostras (**Figura 3**), são dados resultantes de projetos executados pelo Serviço Geológico do Brasil-SGB/CPRM.

O Serviço Geológico do Brasil-SGB/CPRM tem a missão de gerar e disseminar conhecimento geocientífico com excelência, contribuindo para a melhoria da qualidade de vida

e ao desenvolvimento sustentável do Brasil. Seguindo essa missão, o SGB tem realizado levantamentos geoquímicos como suporte aos programas de mapeamento básico e de recursos minerais, através de levantamentos geoquímicos regionais sistemáticos.

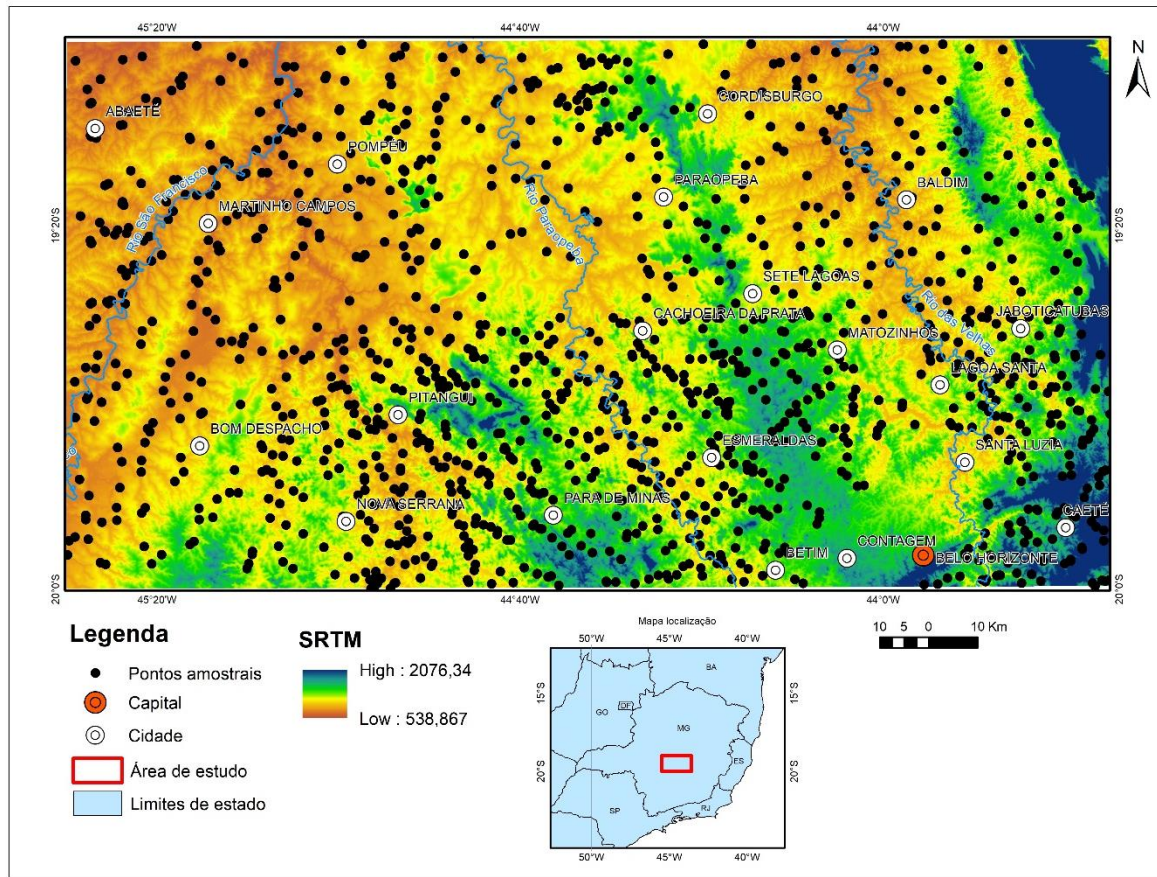
A coleta das amostras selecionadas para a área de estudo ocorreu no período de 2008 a 2013, fazendo parte do Quadrilátero Ferrífero e região. É composta por 1.322 amostras de sedimento de corrente (fração < 80 mesh e digestão por água régia), já coletadas e analisadas para 53 elementos (Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Pd, Pt, Rb, Re, S, Sb, Sc, Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr), via Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) e Espectrometria de Massa por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS).

Estudos indicam que a abertura e as amostras de sedimento ativo de corrente coletadas na fração < 80# constituem um meio de amostragem eficiente para trabalhos de mapeamento geoquímico (LARIZZATTI *et al.*, 2014); a abertura por água régia, por sua vez, proporciona um tipo de ataque que solubiliza totalmente a maioria dos sulfetos, óxidos, argilominerais e elementos ligados à matéria orgânica. Essa metodologia é interessante em pesquisas que objetivam obter as concentrações de elementos-traço de interesse ambiental (ALBANESE *et al.*, 2006; FERREIRA, 2000).

Procedimentos analíticos, tais como ICP-OES e ICP-MS, são utilizados como Protocolo Padrão Internacional em projetos de mapeamento geoquímico (REIMANN *et al.*, 2012a, 2014a, 2018a).

As coletas destes dados seguiram procedimentos de coleta, preparação e análise, aceitos internacionalmente e com um controle de QA/QC em todas as etapas. Os pontos amostrados foram, através da delimitação de microbacias, de 1ª a 3ª ordem.

Figura 3: Distribuição amostral dos sedimentos de corrente.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

3.2 Apresentação dos métodos de coleta, preparação e análise das amostras

Uma vez que as amostras foram coletadas em projetos do Serviço Geológico do Brasil – CPRM, será descrito, aqui, o protocolo de amostragem geoquímica e o tratamento das amostras de sedimento de corrente para posterior análise química.

Seguem, abaixo, as principais etapas, os procedimentos de controle de qualidade adotados na coleta e a seleção da amostra para análise química:

- i) A coleta da amostra bruta de sedimentos de corrente em cursos d'água de sedimentação ativa é realizada a uma profundidade de 0 a 10 cm. É composta com 5 a 10 porções (incrementos) de material coletados em diversos pontos da drenagem, alternando entre o canal (material mais grosso) e as zonas próximas às margens (material mais fino), em trecho de drenagem entre 20 e 30 metros, com coletas de aproximadamente 3 kg de sedimentos de corrente por ponto de

amostragem (incluindo as duplicatas). As amostras coletadas são armazenadas em sacos plásticos identificados;

ii) As amostras coletadas são descritas previamente, em campo, e produzido o registro fotográfico;

iii) Realiza-se o registro de informações, tais como: coordenadas geográficas, hora e data da coleta, ocorrência de afloramentos e condições climáticas (de forma a compor o banco de dados);

iv) Todas as ferramentas utilizadas na amostragem são higienizadas com água corrente do próprio ponto amostral, antes e após a coleta;

v) Em laboratório, as amostras são secas em estufa a 60 °C, com posterior desagregação, quarteamento, peneiramento e pesagem. De cada amostra, são extraídos aproximadamente 50 g da fração < 0,177 mm (< 80 mesh). Esta alíquota é separada e armazenada em sacos de polietileno, sendo identificada e enviada para análise química.

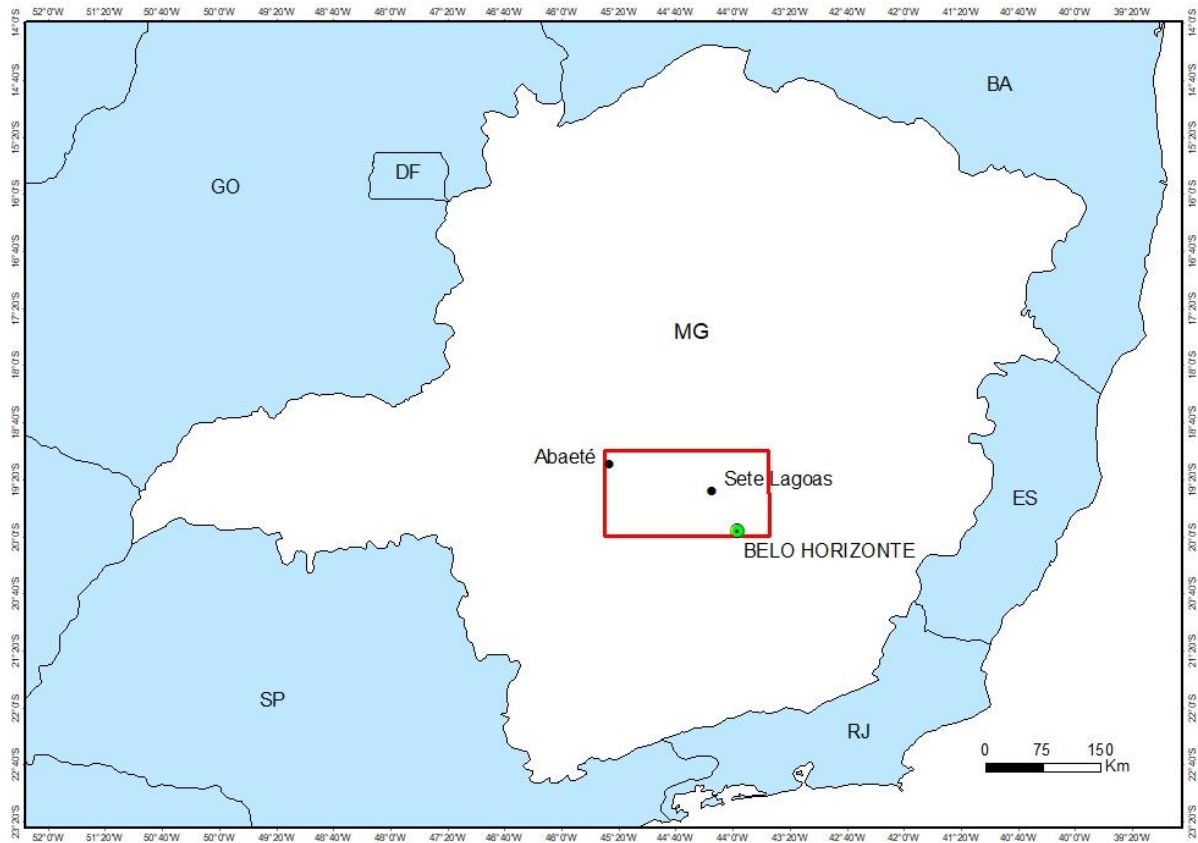
3.3 Caracterização da área de estudo

3.3.1 Localização

A área de estudo está delimitada pelas coordenadas geográficas a 19°00' - 20°00' de latitude sul, e a 43°30' - 45°30' de longitude oeste, no extremo sudeste da Bacia do São Francisco, no Estado de Minas Gerais (**Figura 4**). Com área de aproximadamente 22.308 km², abrange vários municípios, como a capital mineira, Belo Horizonte, e as seguintes localidades: Abaeté, Pompéu, Sete Lagoas, Baldim, Bom Despacho, Pará de Minas, Inhaúma, Pedro Leopoldo, Betim, Contagem, Lagoa Santa, Nova Lima e outras.

A escolha da área se deu por ser uma região de grande importância econômica para o Estado, conforme apresentado a seguir, mas também por ser uma região com uma densidade amostral alta — possibilitando um tratamento robusto e confiável dos dados.

Figura 4: Mapa de localização da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

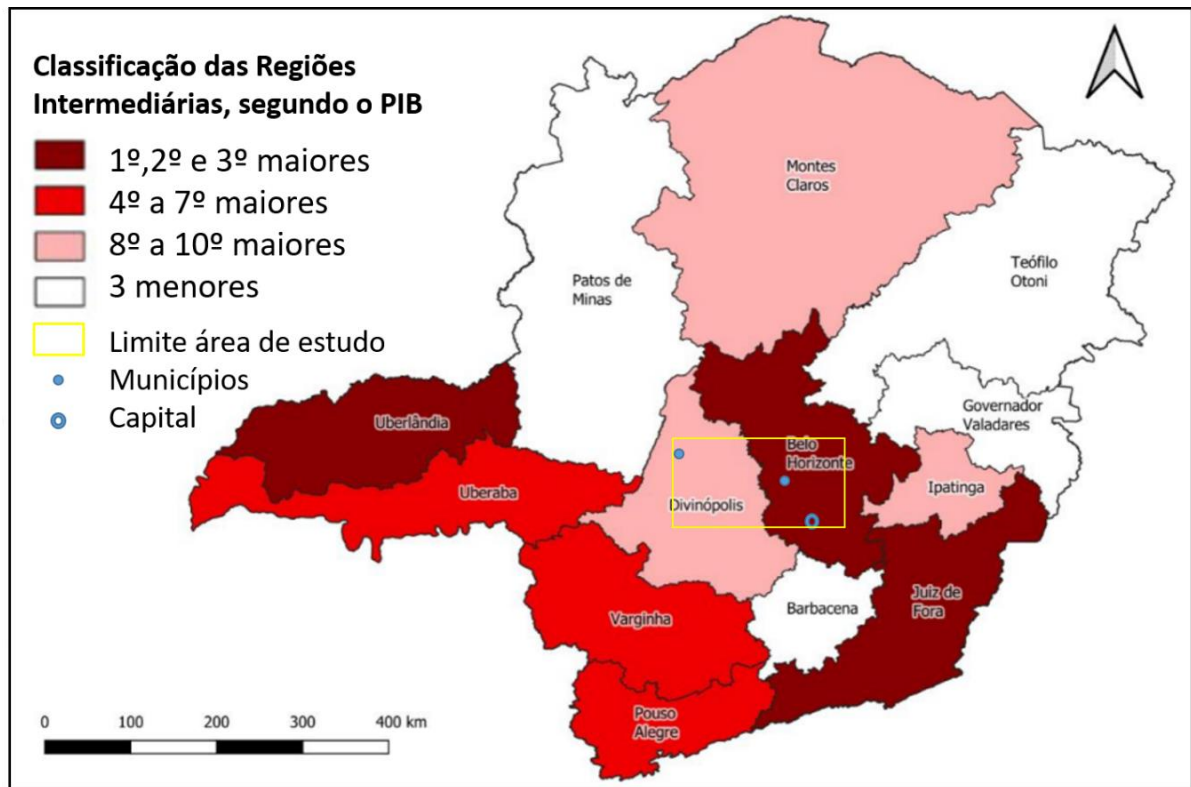
3.3.2 Aspectos Socioeconômicos

Em termos socioeconômicos, a economia mineira, em 2017, foi responsável pelo valor de produção de R\$ 980,82 bilhões, sendo que o setor agropecuário teve uma contribuição de 5,7% (R\$ 28,71 bilhões); a indústria, 25,4% (R\$ 128,38 bilhões); e os serviços, 68,9% (R\$ 347,81 bilhões) (FJP, 2019). Dos 853 municípios do estado, dois municípios concentraram 21,38% do PIB (Belo Horizonte e Uberlândia), sendo Belo Horizonte responsável por 15,44% (FJP, 2019).

A região do trabalho abrange Belo Horizonte e também alguns municípios que fazem parte dos 20 municípios de maior PIB em 2017 (**Figura 5**), tais como: Contagem, Betim e Sete Lagoas. Municípios estes pertencentes à Região Geográfica Intermediária (RGINT) de Belo Horizonte, e que também possui parte da área de estudo pertencente à RGINT de Divinópolis, sendo que a RGINT de Belo Horizonte representa uma grande participação na produção industrial do estado. Ademais, dos 20 municípios de maior participação na produção, nove

pertencem a essa região. A RGINT de Divinópolis produziu 5,73% do PIB mineiro em 2017, tendo a agropecuária como destaque, com 8,31% de contribuição (FJP, 2019).

Figura 5: Distribuição das RGINS, segundo participação no PIB – Minas Gerais – 2017.



Fonte: Modificado do Mapa 14 da Fundação João Pinheiro; Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística. (FJP, 2019).

Belo Horizonte é o município mais populoso do estado. Com uma população de 2,52 milhões de habitantes, de uma população estimada de 21,12 milhões de habitantes, somente a RGINT de Belo Horizonte apresenta uma participação de 37% da riqueza produzida no Estado em 2017 (FJP, 2019).

O cálculo do PIB dos municípios no Sistema de Contas Regionais (SCR) baseia-se no rateio do Valor Adicionado Bruto (VAB) a preços básicos e em termos correntes das atividades econômicas de cada unidade da federação (FJP, 2022).

Entre os dez municípios com maiores participações no VAB industrial do estado, Belo Horizonte se destaca como o município de maior representatividade na atividade industrial em 2019. A capital mineira teve uma queda na participação no PIB estadual no período, por conta da evolução nominal desfavorável nos serviços de informação e comunicação, mas apresentou um desempenho favorável na indústria manufatureira, como também os municípios de Betim,

Nova Lima, Contagem e Sete Lagoas. Belo Horizonte se destacou na fabricação de produtos de papel, de instrumentos médicos e cirúrgicos, de alimentos e na indústria têxtil; Betim (na indústria de veículos, peças, na fabricação de coque, de produtos derivados do petróleo e biocombustíveis); Nova Lima (na indústria extrativa mineral); Contagem (na fabricação de produtos de metal, máquinas e equipamentos, e de alimentos); e Sete Lagoas (na fabricação de caminhões, ônibus e carrocerias), além de sua evolução favorável na atividade de energia e saneamento (no consumo e distribuição de energia elétrica), bem como na construção civil. (FJP, 2022).

3.3.3 *Clima*

O Brasil é um país que apresenta uma grande variação climática. A Região Sudeste, em especial, Minas Gerais, possui características de um clima de transição, que sofre influência de fenômenos meteorológicos com latitudes médias e tropicais, posicionando-se em uma faixa de transição entre sistemas tropicais com períodos secos e úmidos definidos; e extratropicais, que sofrem a influência das frentes polares e faz com que essa faixa fique permanentemente úmida (NUNES *et al.*, 2009; NIMER, 1979).

A grande variação de tipos climáticos, do tropical ao subtropical, da Região Sudeste do Brasil, ocorre em decorrência das suas características naturais, como topografia e cobertura vegetal, resultando em um rico mosaico físico (NUNES *et al.*, 2009).

Em relação ao período chuvoso, de acordo com a análise dos mapas de precipitação acumulada do INMET, o estado de Minas Gerais possui o período de estação chuvosa iniciando-se em outubro. Historicamente, o declínio da estação chuvosa inicia-se em fevereiro, com uma expressiva redução nos totais de chuvas em relação ao mês de janeiro, mas ainda apresenta uma frequência até o mês de março, ocorrendo, preferencialmente, sob a forma de pancadas ocasionais e localizadas. Abril é um mês típico de transição entre a estação chuvosa e a seca, quando as chuvas se reduzem gradativamente ao longo do mês, tornando-se cada vez mais raras. (INMET, 2022). O trimestre de julho a setembro, historicamente, é o mais seco do ano, sendo considerado dia seco aquele com chuva acumulada inferior a 5 mm. (INMET, 2019).

De acordo, também, com os dados obtidos no INMET, a temperatura média do estado de Minas Gerais varia entre 19,4 °C a 23,7 °C ao longo do ano, para o período analisado nos anos de 1991 a 2020, com temperaturas máximas nos meses de janeiro, fevereiro e outubro:

28,7 °C, 29,1 °C e 28,7 °C, respectivamente. E temperaturas mínimas nos meses de maio a agosto, com temperaturas entre 15,4 °C a 16,6 °C, medidos da estação Belo Horizonte.

A vegetação é influenciada pelo clima e pelo relevo, sendo que, no Estado de Minas Gerais, encontram-se cinco tipos de vegetação: Cerrado, Matas Secas e Pluviais, Campos Limpos e Caatinga (RIZZINI, 1997). Na área de estudo, tem-se a predominância dos tipos: Cerrados e Matas Secas, com dominância do Cerrado. O Cerrado possui uma vegetação aberta constituída de árvores com alturas variáveis, onde as copas não se tocam, podendo alcançar até 8 metros. As árvores e os arbustos são geralmente tortuosos e têm folhas coriáceas e/ou pilosas (FERRI, 1980). As Matas Secas, predominantes em regiões de rochas calcárias, são mais abertas e iluminadas que as matas úmidas; as árvores guardam maior distância entre si e apresentam perdas de suas folhas muito maiores em determinadas épocas do ano (RIZZINI, 1997). Ao longo das drenagens, pode-se observar as matas ciliares bem desenvolvidas.

3.3.4 Hidrografia

A bacia hidrográfica do rio São Francisco é a maior bacia hidrográfica localizada exclusivamente no Brasil, consistindo em um vasto território de, aproximadamente, 640 mil km², rico em recursos naturais, história e cultura da população brasileira. Com 2.700 km de extensão, corta cinco estados brasileiros: Minas Gerais, Bahia, Pernambuco, Sergipe e Alagoas (CASTRO & PEREIRA, 2019) — sendo responsável por drenar cerca de 40% das terras do estado de Minas Gerais (CARNEIRO *et al.*, 2005).

A área do projeto está inserida na bacia hidrográfica do rio São Francisco, nas seguintes sub-bacias: Velhas, Paraopeba e Entorno da Represa de Três Marias (BETTENCOURT *et al.*, 2016). Essas sub-bacias são de grande importância e têm seus nomes relacionados com seus principais rios presentes na área, tais como São Francisco, Paraopeba, das Velhas, entre outros, que juntamente com seus tributários, formam uma densa e importante rede de cursos d'água de grande importância social e econômica para o estado. Esses cursos d'água, de maior ou menor expressividade, possuem formas e padrões relacionados com os litotipos presentes e os condicionantes estruturais. Onde existe o predomínio de rochas pelíticas e areníticas, a drenagem é dendrítica; enquanto as áreas de alinhamentos estruturais (fraturas e/ou falhas) exibem um padrão de drenagem retangular. Nas áreas cársticas são observados sumidouros, dolinas, grutas e escarpas abruptas, com a circulação e o armazenamento de águas subterrâneas que podem ser responsáveis pelo abastecimento de cidades inteiras, como a cidade de Sete

Lagoas, com mais de 200.000 habitantes (MARQUES, 2010). Morfologicamente, Sete Lagoas localiza-se entre cotas de 700 m a 1.100 m de altitude, sendo circundada pela Serra de Santa Helena, onde essa serra atua como divisor da rede hidrográfica do município em duas bacias, Rio Paraopeba e Rio das Velhas (LEÃO, 2008).

3.3.5 *Geomorfologia*

O Estado de Minas Gerais apresenta um relevo que difere ao de outras regiões do país pela diversidade de quadros morfológicos presentes, resultantes da complexa atividade tectônica atuante nas rochas constituintes do escudo brasileiro a partir do Mesozoico: arqueando, falhando e fraturando tais rochas. (MACHADO & SILVA, 2010).

O relevo da Região Sudeste apresenta os maiores contrastes morfológicos do país, apresentando altas superfícies com predomínio de 500 a 1.200 m em Minas Gerais, e vales amplos rebaixados como do São Francisco, Jequitinhonha e Doce. Sobre estas superfícies, erguem-se numerosas serras, com níveis de 1.200 a 1.800 m, como o Espinhaço (NIMER, 1979).

A região de estudo divide-se em seis áreas com expressões geomorfológicas distintas:

- Área 1: Área de ocorrência dos Complexos Belo Horizonte e Divinópolis, Gnaisse Claudio, Gnaisse Itapeçerica, Granitóide Florestal, Granitóide Maravilhas, dentre outros corpos graníticos. Morfologicamente, essa região apresenta-se arrasada, com morros ondulados compostos por gnaisses, ortognaisses, migmatitos e granitoides, cortados localmente por cristas finas e alongadas com comprimento variando de dezenas de metros a quilômetros (diques máficos). O domínio possui uma área de drenagem dendrítica, com vales abertos e geralmente assoreados (MARQUES, 2010);
- Área 2: A área corresponde à região de ocorrência das rochas carbonáticas (formações Sete Lagoas e Lagoa do Jacaré), presentes na porção nordeste/norte da área, com maior incidência a leste e com diminuição a oeste da área. Ocorre, normalmente, nas encostas de serras, por vezes com declividade abrupta e em morros isolados. Na morfologia cárstica desta área, podem ser observados: sumidouros, dolinas, vales cegos, galerias, grutas, entre outros;
- Área 3: Região representante das unidades correspondentes das formações Serra de Santa Helena e Serra da Saudade, compostas por rochas siliciclásticas que

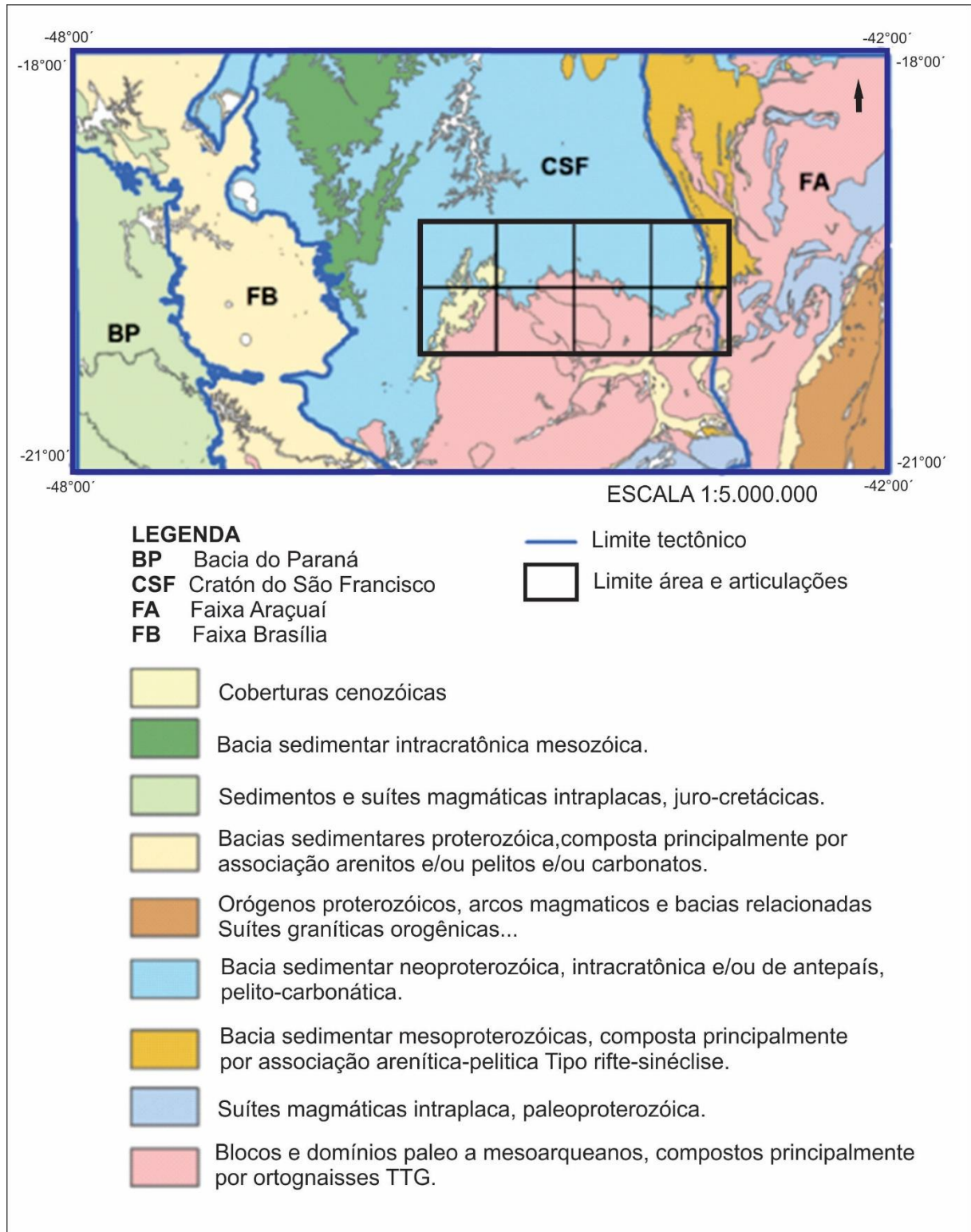
recobrem quase a metade norte da área do projeto. A formação Serra de Santa Helena, com predomínio a nordeste, é caracterizada por relevo ondulado, com colinas e partes rebaixadas, desenvolvidas sobre rochas pelíticas de baixa permeabilidade, onde é comum a formação de lagoas e drenagens com padrão dendríticos como citado em Marques (2010). Na formação Serra da Saudade, com predomínio a noroeste, ocorrem siltitos e arenitos de alta permeabilidade e exibe relevo ondulado com colinas baixas esculpidas por uma rede hidrográfica de geometria dendrítica, onde as cotas médias variam de 800 a 1.100 metros (MARQUES, 2010);

- Área 4: Corresponde a uma pequena área pouco representativa da região de estudo, situada no extremo nordeste, composta principalmente por quartzitos e arenitos do supergrupo Espinhaço e do grupo Macaúbas. As altitudes médias da área possuem cotas entre 1.100 a 1.700 metros. Serras alongadas com cristas e vales bem encaixados são comuns nessa região, apresentando um padrão de drenagem retangular controlado estruturalmente por um sistema de falhas e/ou fraturas preferencialmente na direção NW – NS (MARQUES, 2010);
- Área 5: Região de grande importância econômica, pois é composta por sequências do tipo *greenstones belt*, de rochas vulcano-sedimentares, onde são registrados diversos depósitos e ocorrências, tais como de minério de ferro e ouro. A geomorfologia desta área é condicionada pelas características litológicas e estruturais constituídas, principalmente, por morros e topos alinhados, com cristas bem definidas, normalmente constituídas por formações ferríferas que se destacam na topografia regional;
- Área 6: Representada por uma unidade de grande cobertura areal, é representada por coberturas indiferenciadas compostas por sedimentos clásticos e lateríticos ferruginosos. Morfologicamente, apresenta-se como áreas aplainadas, na forma de chapadas elevadas sobre vales e/ou planícies onduladas. Mas que, neste trabalho, por se tratar de coberturas, normalmente, de sedimentos inconsolidados, foram incorporadas às outras unidades de encobrimento correspondentes, com o uso de fotos aéreas e imagens de geofísica.

3.3.6 Contexto geotectônico e estratigrafia

A área de estudo se encontra na porção sul-sudeste do Cráton do São Francisco, sendo limitada a leste pela Faixa Araçuaí (ALMEIDA, 1977; UHLEIN *et al.*, 1990; UHLEIN, 1991; PEDROSA SOARES *et al.*, 1992), conforme mostra a **Figura 6**.

Figura 6: Mapa esquemático mostrando a posição das folhas estudadas na área de estudo, bem como sua inserção no contexto geotectônico.



Fonte: Modificado de Delgado *et al.*, 2003.

Segundo Alkmim (2004), o Cráton do São Francisco é uma entidade geotectônica que foi consolidada ao final da orogênese brasileira.

A geologia regional é definida, principalmente, por cinco grandes unidades litoestratigráficas que são caracterizadas, da base para o topo, pelos: Complexos Metamórficos; Supergrupo Rio das Velhas; Supergrupo Minas; Supergrupo Espinhaço; e Grupo Bambuí.

As rochas do Grupo Bambuí foram depositadas sobre rochas arqueanas pertencentes aos complexos Belo Horizonte (RIBEIRO *et al.*, 2003) e Divinópolis (ROMANO, 2007); sobre os metassedimentos do Supergrupo Espinhaço de idade paleo-mesoproterozóica, unidades não envolvidas na deformação Brasileira (PFLUG, 1965, 1968; PFLUG & RENGER, 1973); e sobre o Grupo Macaúbas (PFLUG, 1965, 1968; PFLUG & RENGER, 1973), de idade neoproterozóica.

Segundo Almeida (1977), durante o evento Brasileiro ocorreu a inversão parcial da Bacia Espinhaço cavalgando sobre as rochas dos grupos, Macaúbas e Bambuí. Na região do contato faixa Araçuaí – Cráton, a deformação brasileira foi melhor impressa com a presença de falhamentos e dobramentos, mas em atingir o embasamento granito-gnáissico dos complexos metamórficos, caracterizando uma tectônica superficial (*thin skinned*) (ALKMIM *et al.*, 1993; PINHO *et al.*, 2006, 2008). À oeste, as unidades estratigráficas apresentam uma menor deformação, mantendo as características sedimentares melhor preservadas, principalmente a partir da Falha de Sete Lagoas, indicando que o evento colisional brasileiro teve influência apenas secundária na estruturação do Grupo Bambuí na região central da bacia (MARSHAK & ALKMIM, 1989).

A borda sudeste da Bacia do São Francisco, onde as relações estratigráficas entre o embasamento cristalino e as rochas sedimentares que o recobrem estão bem definidas, montam uma história evolutiva da sedimentação, permitindo subsidiar a prospecção de jazidas de vários bens minerais metálicos, tais como Zn, Pb, fluorita, etc.; e não-metálicos, como calcário e dolomito, utilizados para os mais diversos fins (MARQUES, 2010).

As unidades estratigráficas da área de estudo fazem parte da Bacia do São Francisco. Dentre elas, podemos descrever como principais:

- 1) Complexos Metamórficos localizados na região sul/sudeste da área de estudo, sendo representados pelos Complexos: Belo Horizonte, Caeté, Divinópolis, Gnaiss Cláudio e Batólito Serra dos Tavares, Batólito Pequi — que representam o embasamento cristalino, de idade arqueana. Estes complexos são constituídos por rochas gnáissicas polideformadas de composição tonalítica a granítica, e subordinadamente por granitos, granodioritos,

anfíbolitos e intrusões máficas a ultramáficas (CORDANI *et al.*, 1980; LADEIRA *et al.*, 1983; TEIXEIRA *et al.*, 2000);

- 2) Supergrupo Rio das Velhas são rochas supracrustais constituídas por metassedimentos vulcanogênicos que definem um cinturão de rochas verdes (DORR, 1969; SCHORSCHER, 1986) de idade arqueana aproximada de 2,78 Ga. (DORR, 1969; SCHORSCHER, 1986). Ocorre o predomínio de rochas vulcano-sedimentares constituídas de xistos carbonáticos, metacherts, formação ferrífera bandada e filitos, tendo as rochas xistosas como as principais fontes de alumínio, magnésio e potássio, e veios sulfetados associados à ocorrência de cádmio e chumbo (PARRA *et al.*, 2007);
- 3) Supergrupo Minas é uma sequência metassedimentar de idade paleoproterozóica de pouca expressão, a sudeste da área de estudo, e encontra-se em contato com as unidades do Supergrupo Rio das Velhas e Complexo Belo Horizonte. Foi, inicialmente, denominado de Série Minas por Dorr (1969), sendo dividida (por este autor) em três grupos, da base para o topo: Caraça, Itabira e Piracicaba. O Grupo Caraça é representado por metassedimentos clásticos de granulação fina a grossa (quartzitos e filitos), depositados durante uma transgressão marinha. O Grupo Itabira caracteriza-se por metassedimentos químicos e divide-se nas Formações Cauê (formações ferríferas), de grande valor econômico na explosão de ferro; e Gandarela (rochas carbonáticas), também importante economicamente por ser a unidade encaixante de depósitos minerais como topázio, ouro, barita e outros, apresentando, com isso, uma grande disponibilidade de cálcio e magnésio (GANDINI, 1994) depositados em ambiente de mar raso. O Grupo Piracicaba é caracterizado por metassedimentos clásticos (quartzitos e filitos) depositados em ambientes de transgressão marinha. A Formação Sabará, de Gair (1958), constitui a unidade mais jovem do Supergrupo Minas; originalmente pertencente ao Grupo Piracicaba, migrou para a hierarquia de Grupo Sabará (RENGER *et al.*, 1994). Representa a unidade de idade paleoproterozóica do Quadrilátero Ferrífero, sendo composta por sedimentação essencialmente terrígena constituída por filitos conglomeráticos na base, tufos, vulcanoclásticas, metaconglomerados e diamictitos, apresentando matriz comumente clorítica e xistosa (BARBOSA & RODRIGUES, 1967; DORR, 1969; RENGER *et al.*, 1994). Segundo Alkmim & Marshak (1998), o Grupo Sabará pode representar turbiditos derivados de terrenos vulcânicos;
- 4) O Supergrupo Espinhaço se localiza a nordeste da área e possui pouca expressão, não sendo o foco do presente estudo. É representado por metassedimentos psamíticos,

homogêneos, com alguns metaconglomerados e filitos intercalados. Estas rochas foram intrudidas por diques e *sills* de metabasitos pós-tectônicos (UHLEIN, 1982). A evolução do Supergrupo Espinhaço se deu como um rifte abortado e com registros de deformação de idade brasileira (KNAUER, 2007), o que evoluiu para uma margem passiva que foi fechada nos tempos finais do Uruaçuano (PFLUG *et al.*, 1980; ALMEIDA ABREU, 1995; KNAUER, 1990). Em contato com as unidades do Supergrupo Espinhaço, no extremo nordeste da área, o Grupo Macaúbas, inicialmente definido como formação, Moraes & Guimarães (1930), trabalhando na região diamantífera do norte de Minas, denominaram a sequência constituída de filitos conglomeráticos e arenitos de origem glacial; mais tarde, a formação Macaúbas foi elevada para a categoria de Grupo (SCHOLL, 1972);

- 5) As rochas sedimentares do Grupo Bambuí configuram-se como a principal unidade de cobertura pré-cambriana do Cráton do São Francisco (MARTINS-NETO & ALKMIM, 2001), o que corresponde a extensas áreas no estado de Minas Gerais constituídas por rochas pelíticas e carbonáticas depositadas em ambiente marinho plataformaraso a profundo (DARDENNE, 1978, 1981; MARTINS-NETO, 2009). A partir de trabalhos como de Costa e Branco (1961) e Dardenne (1978, 1981), o grupo exhibe, da base para o topo, as formações: Carrancas (diamictito, ritmito, arenito); Sete Lagoas (calcário e dolomito, com intercalações pelíticas); Serra de Santa Helena (pelito com lentes de calcário); Lagoa do Jacaré (calcário, siltito); Serra da Saudade (siltito com intercalações de arenito e calcário); e Três Marias (arenito, arcósio, conglomerado) (KUCHENBECKER *et al.*, 2013). A Formação Samburá (conglomerado, arenito) também integra o Grupo Bambuí, ocorrendo apenas na porção sudoeste da bacia (DARDENNE, 1981). O Grupo Bambuí ocupa uma posição de destaque no Estado de Minas Gerais, não somente por sua distribuição areal, mas também por conter importantes recursos minerais em exploração, como zinco, chumbo, fosfato, além de ardósias, fluorita e, em destaque: calcários e dolomitos (COUTO *et al.*, 1981).

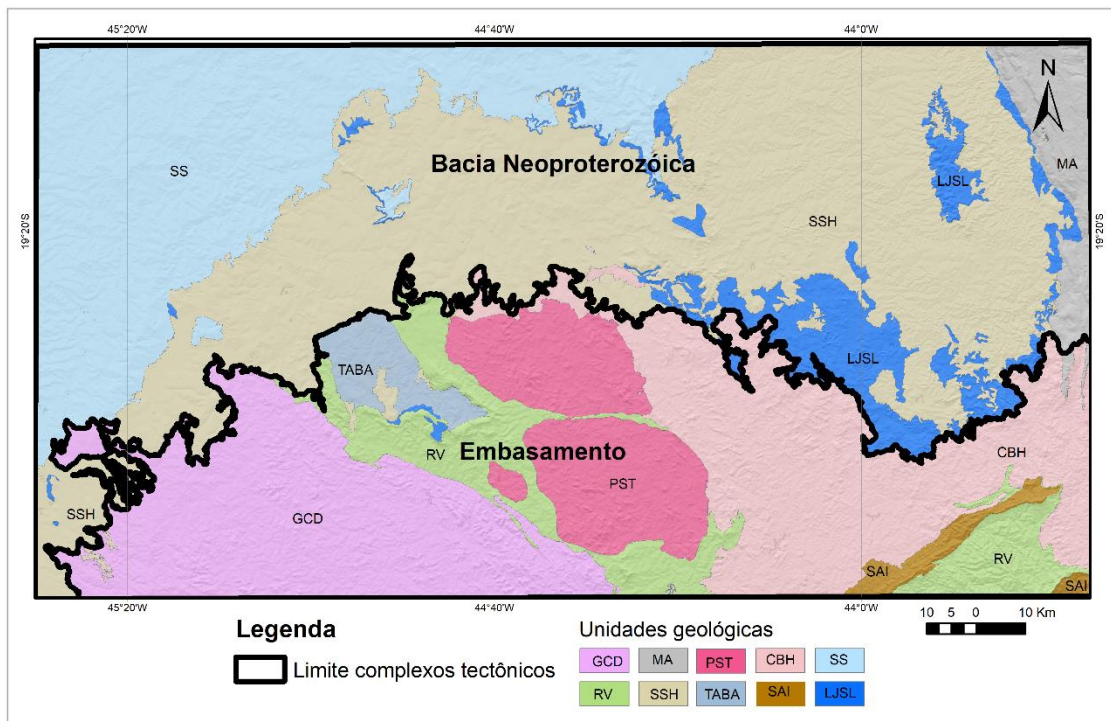
3.3.7 *Compartimentação geológica*

A região de estudo faz parte de dois blocos tectônicos distintos: Bacia Neoproterozóica São-Franciscana e Embasamento Cristalino, ao sul do Cráton do São Francisco (**Figura 7**). Do ponto de vista dos processos geoquímicos de superfície, tais blocos tectônicos podem

influenciar na dispersão e na acumulação dos elementos químicos, pois que a transição entre os blocos configura-se em uma barreira geoquímica (MARQUES, 2010).

Entende-se como barreira geoquímica o local da crosta terrestre onde, em curta distância, ocorre uma rápida redução da intensidade de migração dos elementos químicos, ocorrendo, como consequência, a acumulação seletiva desses elementos (MIRLEAN & ROISENBERG, 2007). Portanto, a capacidade diferencial de migração de elementos químicos numa barreira geoquímica pode levar à formação de um depósito mineral, ou até mesmo acentuar uma contaminação.

Figura 7: Compartimentação tectônica: Bacia Neoproterozóica e Embasamento.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A geologia da Bacia Neoproterozóica do São Francisco é composta basicamente por rochas siliciclásticas e carbonáticas do Grupo Bambuí e, em pequena proporção, pelo Grupo Macaúbas e Supergrupo Espinhaço, este último localizado no extremo NE da área. O embasamento cristalino é composto pelo arcabouço arqueano, representado pelos Complexos Belo Horizonte, Divinópolis, e rochas intrusivas pertencentes ao embasamento; e o Supergrupo Rio das Velhas, representado por uma sequência de rochas vulcano-sedimentares. A SE da área, é observada a presença de rochas pertencentes ao Supergrupo Minas, em contato com as rochas do Supergrupo Rio das Velhas. Para o grande compartimento da bacia neoproterozóica, foi

realizada uma simplificação das unidades compostas por rochas siliciclásticas e carbonáticas do Grupo Bambuí. Os compartimentos tectônicos apresentam diversas subunidades geológicas, que, considerando a escala de trabalho, não são representativas. Portanto, com o intuito de mostrar os resultados de *background* geoquímico baseados nos compartimentos geológicos da área estudada, bem como considerando a densidade amostral, houve a simplificação das unidades geológicas apresentadas a seguir:

- Unidade (SS): Constituída pela Formação Serra da Saudade, composta por depósitos pelíticos de cor verde;
- Unidade (LJSL): Representante das rochas calcárias da Formação Lagoa do Jacaré e Sete Lagoas;
- Unidade (SSH): Constituída pela Formação Serra de Santa Helena, composta por filitos, ardósias e quartzitos, unidade de maior representação areal;
- Unidade (MA): Engloba as unidades do Grupo Macaúbas e do Supergrupo Espinhaço. Tal simplificação se deu com o intuito de não gerar nenhum tipo de influência nas unidades do Grupo Bambuí, uma vez que tais unidades possuem poucas amostras coletadas.

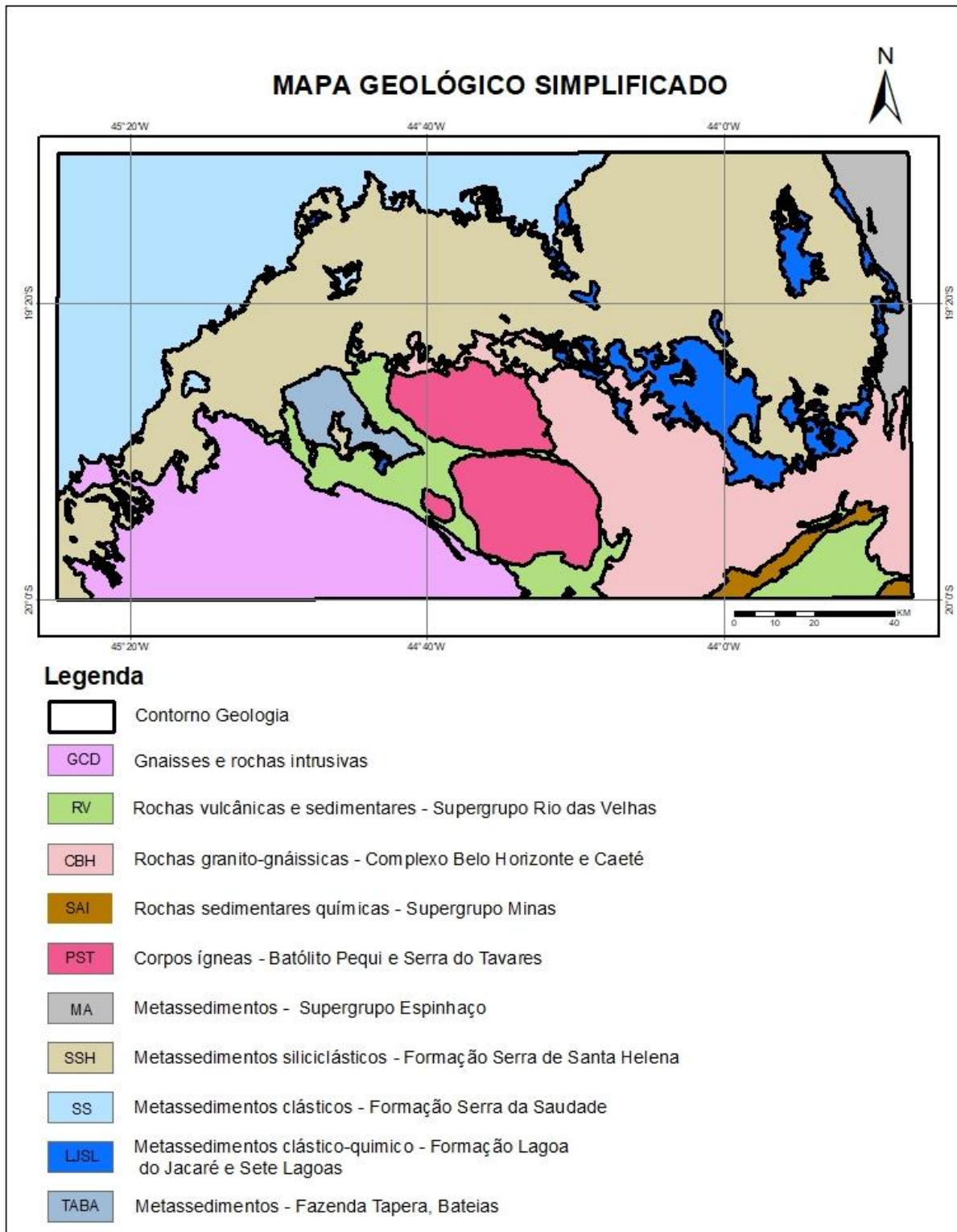
Dentro do compartimento do embasamento cristalino, foram separadas as seguintes unidades:

- Unidade (CBH): Composta por rochas gnáissicas do Complexo Belo Horizonte;
- Unidade (GCD): Composta por rochas gnáissicas do Complexo Divinópolis e Cláudio;
- Unidade (PST): Composta por rochas graníticas do Batólito Tavares e Batólito Pequii;
- Unidade (TABA): Composta por metagrauvacas da Formação Tapera (Paleoproterozóico) e do Conglomerado Bateias;
- Unidade (RV): Composta por rochas metavulcânicas e metassedimentares do Supergrupo Rio das Velhas (Grupo Nova Lima, Formação Onça do Pitangui, Formação Rio Pará, Formação Rio São João, Formação Antimes, entre outras litofáceis de menor expressão);

- Unidade (SAI): composta de rochas xistosas e, de modo subordinado, quartzitos, quartzitos ferruginosos dos Grupos Sabará e Itabira, Supergrupo Minas (unidade com baixa densidade amostral).

A simplificação das unidades geológicas foi possível a partir da compilação do Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, executado pelo Serviço Geológico do Brasil (CPRM), em escala 1:1.000.000 (SILVA *et al.*, 2020), conforme a **Figura 8**.

Figura 8: Mapa geológico simplificado.



Fonte: Modificado a partir da compilação, Mapa Geológico do Estado de Minas Gerais, do Programa Geologia do Brasil: Projeto Mapas Geológicos Estaduais, SGB-CPRM, escala 1:1.000.000, 2020.

3.4 Processamento dos dados geoquímicos e análises estatísticas com utilização de técnicas uni e bivariadas

Os procedimentos utilizados serão os indicados e aplicados por vários autores (CARITAT *et al.*, 2001; CARITAT & COOPER, 2016; REIMANN & CARITAT, 2017; REIMANN *et al.*, 2008, 2018), seguindo um protocolo para a análise de dados geoquímicos, tais como:

- Estatística univariada que represente a distribuição da população de cada variável (elemento químico) e que permita analisar o comportamento estatístico e espacial, sua estruturação; definir os estimadores a partir do sumário estatístico; e definir a presença ou não de subpopulações;
- Estatística bivariada com o objetivo de estabelecer a relação entre dois elementos.

Foram selecionados, para o tratamento estatístico convencional (estatística univariada), 40 elementos dos 53 analisados. Dentre os 40, terão destaque 21 elementos que são considerados potencialmente tóxicos, onde o elemento boro (B) não será considerado em tal etapa de tratamento devido ao baixo grau de detecção, ou seja, apresentou mais de 50% das amostras abaixo do limite de detecção (dados censurados).

Após os procedimentos para análise dos dados, eles serão submetidos à análise estatística descritiva para a determinação de diversos parâmetros, como: amplitude, médias, desvio padrão, desvio absoluto da mediana, mediana, coeficiente de variação, entre outros.

A definição da normalidade deve ser realizada seguida de testes adequados aos resultados, tais como: testes de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov. Serão gerados *boxplots*, histogramas, gráficos de probabilidade e gráficos de dispersão, para os elementos químicos analisados, bem como demais variáveis investigadas.

Após o tratamento estatístico univariado, serão utilizadas ferramentas estatísticas bivariadas, pois estes tratamentos permitem: o estabelecimento de tendências e associações dos elementos analisados; a compreensão dos processos geológicos, físicos e antropogênicos que controlam os resultados geoquímicos (MANLY, 1986; DAVIS, 1986; TABACHNICK & FIDELL, 2001; REIMANN *et al.*, 2002; REIMANN *et al.*, 2008; FILZMOSEER *et al.*, 2009; CARRANZA, 2009, 2011; GRUNSKY, 2010; LAPWORTH *et al.*, 2012).

3.5 Determinação dos valores de *Background* geoquímico a partir de métodos modernos recomendados

Como já exposto, dentre os métodos de definição de *background* geoquímico, o método estatístico (método indireto) é o mais comum. Este se utiliza de técnicas e ferramentas gráficas, computacionais e testes estatísticos probabilísticos, de forma a apresentar a distribuição dos resultados das análises químicas.

Para tanto, utiliza-se de técnicas estatísticas em diversos níveis, com o intuito de: organizar um conjunto de dados; identificar seu comportamento e sua estruturação; caracterizar padrões; definir estimadores; definir faixas de concentração de *background* e de anomalias; definir a presença de subpopulações; definir relações entre as variáveis (elementos); definir a distribuição e o comportamento destas variáveis no espaço (VICQ, 2015; SALOMÃO, 2020).

Durante um grande período de tempo, a avaliação do *background* geoquímico tinha como principal método a definição dos limiares através da média $\pm 2^*$ desvio padrão, que pressupõe uma distribuição normal dos dados (curva gaussiana), em desuso (REIMANN *et al.*, 2005). Contudo, para a maioria das variáveis descritas no âmbito da geoquímica (elementos químicos), estas corriqueiramente apresentam distribuições assimétricas, quase sempre com assimetria positiva (REIMANN *et al.*, 2008).

Apesar disso, a maioria das distribuições geoquímicas podem alcançar a distribuição normal ao se aplicar uma transformação (anamorfose) aos dados originais, forçando uma normalização da distribuição ou lognormalidade (REIMANN *et al.*, 2002, 2008; REIMANN & CARITAT, 2017).

Atualmente, uma gama de métodos são utilizados na literatura, tais como Média ± 2 Desvios-Padrão (em desuso); Percentis 95th e 98th; Técnica de 2σ iterativo ($I2\sigma$); Função de Distribuição Calculada (CDF); MAD (*Median Absolute Deviation*); TIF (*Tukey's Inner Fence*); e, recentemente, o modelo fractal (REIMANN *et al.*, 2018a; REIMANN & CARITAT, 2005, 2017; SAHOO *et al.*, 2020b; SALOMÃO *et al.*, 2018, 2019a; CHENG *et al.*, 1995, 1999, 2000).

Dentre os métodos citados, neste trabalho serão realizados três deles, devido à robustez mostrada em trabalhos prévios, a saber: o desvio absoluto da mediana (MAD); o TIF, amplamente conhecido através do gráfico *boxplot*; e, por fim, o modelo fractal. O MAD requer que os dados possuam distribuição normal. Portanto, a tentativa de normalização por lognormalização, ou outra transformação, é obrigatória. O cálculo dos valores de *background*

do MAD (1) é obtido através do desvio absoluto da mediana, calculado através do produto com uma constante (1,4826), tendo como resultado uma estimativa consistente do desvio padrão (REIMANN *et al.*, 2018). Portanto, a faixa de *background* é definida pela mediana $\pm 2 \cdot \text{MAD}$. Essa técnica é bastante utilizada por ser robusta, minimizando os efeitos de *outliers*:

$$(1) \text{ MAD } (y) = K \cdot \text{mediana}_i |y_i - \text{mediana}_j (y_j)| \therefore A_MAD = 10 (\text{mediana } (y) \pm 2 \cdot [\text{MAD}_y])$$

Onde K é uma constante para o ajuste a uma distribuição normal (K = 1,4826).

A_MAD é o anti-log, ou o algoritmo inverso, da transformação aplicada.

O TIF, mais conhecido como “limiars do *boxplot*”, é calculado através dos *whiskers* superior e inferior, definindo-se os limiars da faixa de *background* (2 e 3). Assim como o MAD ou qualquer outro cálculo, os dados precisam ser transformados, neste caso, lognormalizados. Essa técnica é recomendada por Matschullat *et al.* (2000a) e Reimann *et al.* (2005, 2018), pois este método depende apenas da distribuição dos dados.

$$(2) \quad \text{TIF (limiar superior} = 10 (\log_{10} (Q3) + 1,5 \cdot \log (AIQ))$$

$$(3) \quad \text{TIF (limiar inferior} = 10 (\log_{10} (Q1) - 1,5 \cdot \log (AIQ))$$

Onde AIQ equivale à Amplitude Interquartil (Q3 - Q1).

Desta forma, a técnica TIF é mais informativa se o número real de *outliers* for inferior a 10%; e se a proporção de *outliers* for superior a 15%, o MAD terá um melhor desempenho (REIMANN *et al.*, 2005).

Métodos convencionais de estatística em ambientes geológicos complexos ou em regiões que sofreram grandes influências das ações antrópicas possuem eficiência limitada (BAI *et al.*, 2009). De forma a tentar mitigar essas limitações, algumas técnicas estatísticas podem ser utilizadas com o uso de procedimentos que considerem a variabilidade espacial de valores geoquímicos, como: a análise multifractal para calcular os valores de *background* geoquímico (NAZARPOUR *et al.*, 2015; SADEGHI, & COHEN, 2021). O modelo multifractal permite entender um ambiente complexo e não regular, como o próprio significado do nome (do latim, *fractus*, que significa fração), nos permitindo entender as partes.

Para as diversas técnicas e tratamentos descritos, será realizado um tratamento dos dados geoquímicos considerando toda a área de estudo. Em uma segunda etapa, serão considerados os dados geoquímicos por compartimento geológico e de uso e ocupação do solo.

3.6 Determinação dos índices ambientais

Os sedimentos têm a capacidade de acumular elementos químicos em sua estrutura através dos diversos mecanismos, tais como adsorção, precipitação, entre outros, tornando-se uma ótima matriz para registro de processos que ocorrem em uma bacia de drenagem, sejam por processos naturais ou de origem antrópica (REIMANN & CARITAT, 1998; MOREIRA, 2002; SAHUQUILLO *et al.*, 2002).

Os índices ambientais permitem quantificar o enriquecimento e o empobrecimento desses elementos em diversas matrizes geológicas, principalmente sedimentos e solos. Para isso, é necessário compará-los com os valores de referência (SIVAKUMAR *et al.*, 2016).

Valores de referência devem ser considerados livres da influência antrópica; neste caso, é utilizada com frequência a média crustal (UCC). Contudo, devido à grande variação de concentrações ocasionadas pela grande variabilidade dos substratos geológicos (litotipos) e diferentes atividades antropogênicas, o uso dessa referência pode subestimar ou superestimar os cálculos e não fornecer um resultado coerente com a realidade. Dessa forma, o uso do valor de referência (*background*) da própria área leva a resultados mais fidedignos, principalmente levando-se em consideração os valores de *background* calculados para as unidades geológicas. Diversas ferramentas podem ser usadas para calcular os índices de contaminação, tais como: Fator de Enriquecimento (FE); Fator de Contaminação (FC); Índice de Poluição (PLI); Grau de Contaminação Modificado (GCm); e Risco Ecológico (RE).

3.6.1 Fator de Enriquecimento

O Fator de Enriquecimento (FE), como indicado pelo nome, indica o enriquecimento de determinado metal na amostra, seja de origem natural ou não, podendo ser calculado com diferentes normalizadores — Al, representando argilominerais, é considerado um elemento conservativo, (Fe + Mn) representando os hidróxidos de Fe e Mn, e (Ca + Mg) representando os carbonatos. Esses elementos são utilizados por serem abundantes na crosta, sendo os principais agentes de adsorção na natureza, e, por terem afinidade com elementos-traço, o comportamento destes elementos são altamente influenciados por eles (LIN & CHEN, 1998; LATRILLE *et al.*, 2001; SILVA-FILHO *et al.*, 2014).

$$FE = (C_X/C_R)_S / (C_X/C_R)_{VR \text{ \u00e1rea}}$$

Onde: C_X \u00e9 a concentra\u00e7\u00e3o do metal escolhido; C_R \u00e9 a concentra\u00e7\u00e3o do elemento normalizador; S representa que o c\u00e1lculo do elemento escolhido \u00e9 realizado para cada amostra; e VR \u00e1rea significa que \u00e9 referente aos valores de refer\u00eancia (*background*) do elemento escolhido para a \u00e1rea.

De acordo com Kamani *et al.* (2015), podemos classific\u00e1-los em sete classes:

- $FE \leq 1$: N\u00e3o polu\u00eddo;
- $1 < FE \leq 3$: Pouco a moderadamente polu\u00eddo;
- $3 < FE \leq 5$: Moderadamente polu\u00eddo;
- $5 < FE \leq 10$: Moderadamente a altamente polu\u00eddo;
- $10 < FE \leq 25$: Altamente polu\u00eddo;
- $25 < FE \leq 50$: Altamente a extremamente polu\u00eddo;
- $FE > 50$: Extremamente polu\u00eddo.

3.6.2 Fator de Contamina\u00e7\u00e3o

O Fator de Contamina\u00e7\u00e3o (FC) \u00e9 a raz\u00e3o entre o metal contido no sedimento para o valor de refer\u00eancia do metal (*background*) da \u00e1rea de estudo. \u00c9 uma ferramenta efetiva para monitorar a polui\u00e7\u00e3o em um per\u00edodo de tempo (SIVAKUMAR *et al.*, 2016). \u00c9 calculado da seguinte forma:

$$FC = C_S/C_{BG},$$

Onde: C_S \u00e9 a concentra\u00e7\u00e3o do metal poluente na amostra; e C_{BG} \u00e9 a concentra\u00e7\u00e3o do *background* calculado do metal poluente para a \u00e1rea de estudo.

De acordo com Hakanson (1980):

- $FC < 1$: indica baixa contamina\u00e7\u00e3o;
- $1 < FC < 3$: moderada contamina\u00e7\u00e3o;
- $3 < FC < 6$: consider\u00e1vel contamina\u00e7\u00e3o;
- $FC > 6$: alta contamina\u00e7\u00e3o.

3.6.3 Índice de Poluição

O Índice de Poluição (PLI) representa o número de vezes pelo qual a concentração do metal pesado no sedimento ultrapassou o valor de referência (*background*), sendo obtido pela somatória dos Fatores de Contaminação (FC) já obtidos, multiplicados entre si e elevados à potência fracionada do número de metais poluentes considerados (n). O PLI indica o nível geral de metal pesado poluente em uma amostra (SIVAKUMAR *et al.*, 2016).

$$PLI = \sqrt[n]{FC1 \times FC2 \times \dots \times FCn}$$

Onde: FC representa os fatores de contaminação dos elementos poluentes já calculados; e n é o número de metais poluentes.

São classificados os resultados: $PLI > 1$ como poluído; e $PLI < 1$ como não poluído.

3.6.4 Grau de Contaminação e Grau de Contaminação Modificado.

Para o controle da poluição, pode-se usar o Grau de Contaminação (GC), determinado como a soma do FC para cada amostra dos metais poluentes considerados.

$$GC = \sum_{i=1}^n FCi$$

De acordo com Hakanson (1980):

- $GC < 6$: Baixo grau de contaminação;
- $6 < GC < 12$: Grau moderado de contaminação;
- $12 < GC < 24$: Grau considerável de contaminação;
- $GC > 24$: Alto grau de contaminação.

O Grau Modificado de Contaminação (GCm) foi introduzido para estimar o grau geral de contaminação em um determinado local ou área, e pode ser calculado através do somatório dos fatores de contaminação dos metais considerados divididos pelo número de metais poluentes considerados.

$$GCm = \frac{\sum_{i=1}^n FCi}{n}$$

Para a classificação e a descrição do Grau Modificado de Contaminação (GCm) no sedimento, a seguinte escala é proposta por Hakanson (1980):

- $GCm < 1,5$: é nulo para um grau muito baixo de contaminação;
- $1,5 \leq GCm < 2$: é um baixo grau de contaminação;
- $2 \leq GCm < 4$: é um grau moderado de contaminação;
- $4 \leq GCm < 8$: é um grau alto de contaminação;
- $8 \leq GCm < 16$: é um muito alto grau de contaminação;
- $16 \leq GCm < 32$: é um extremamente alto grau de contaminação;
- $GCm \leq 32$: é um grau ultra-alto de Contaminação.

3.6.5 Risco Ecológico

O índice de Risco Ecológico potencial (RE) pode ser usado para avaliar as características e o comportamento ambiental de metais pesados contaminantes em sedimentos, indicando agentes contaminantes e locais de atenção prioritárias (HAKANSON, 1980).

O índice de Risco Ecológico potencial (RE) é calculado por:

$$RE = \sum_{i=1}^n T_r^i * FC_i$$

Onde: T_r é o fator de resposta à toxicidade de um determinado metal, sendo este valor tabelado; e FC_i é o fator de contaminação para cada EPT considerado.

Os fatores de respostas tóxicas padronizadas para os elementos são: As (10), Cd (30), Co (5), Cr (2) Cu (5), Mo (5), Ni (5), Pb (5), U (2), Zn (1). (HAKANSON, 1980).

Para a classificação e a descrição do Risco Ecológico (RE), Doležalová Weissmannová, *et al.* (2019) propõem a seguinte escala:

- $RE < 90$: baixo risco ecológico;
- $90 > RE < 180$: risco ecológico moderado;
- $180 > RE < 360$: forte risco ecológico;
- $360 > RE < 600$: risco ecológico muito forte;
- $RE > 600$: risco ecológico muito muito forte.

3.7 Desenvolvimento de um SIG do projeto e cartografia geoquímica

O SIG representará a distribuição geográfica compondo dados vetoriais (*shapefile*) e matriciais (raster), todos representados e padronizados no Sistema de Referência Geográfico, SIRGAS 2000.

Diversas técnicas cartográficas serão utilizadas, visando permitir a representação e a distribuição dos dados de sedimento de corrente, principalmente a distribuição dos dados por microbacias, tendo como resultado a geração dos mapas temáticos como produtos cartográficos. Tais produtos foram confeccionados a partir do uso dos *softwares*: ArcGIS 10.7.1 e Quantum GIS 3.18.

Uma vez analisada a distribuição dos dados de cada elemento com diferentes transformações, invariavelmente estas apresentam subpopulações. Estas subpopulações se devem tanto à diversidade de litotipos, quanto a vários outros fatores, desde fenômenos geológicos até diversas influências antropogênicas (uso e ocupação do solo).

Portanto, pode-se arbitrar alguns critérios, tais como analisar as unidades geológicas, que, ainda sim, de acordo com a escala trabalhada, podem mostrar distribuições que caracterizem subpopulações (devido à diversidade litológica), dependendo do número de litotipos.

O uso de bacias na confecção de mapas geoquímicos tem sido visto de forma importante, pois “evita a interferência” entre amostras (SPADONI, 2006), estabelecendo com precisão as fontes de contaminação ou anomalias significativas em bacias de captação individuais (CARRANZA, 2010).

Logo, os mapas para sedimentos de corrente serão representados por bacias de drenagem e por mapas de pontos, que podem ser de diferentes tamanhos e cores, de acordo com a faixa de teores e o objetivo da temática.

4. APRESENTAÇÃO E DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.

Os resultados obtidos para os 21 elementos selecionados, sendo estes considerados elementos potencialmente tóxicos (EPT's) para os ecossistemas, foram explorados usando técnicas estatísticas comuns (estatística univariada), incluindo: sumário estatístico; gráficos *boxplot*; mapas geoquímicos de tais elementos, baseados em microbacias; estatística bivariada; cálculos de índices ambientais e distribuição espacial dos valores de referências; e índices através de técnicas cartográficas e do *software*, ArcGIS. Tais ferramentas estatísticas permitem investigar o comportamento, as tendências e as associações dos elementos analisados, levando ao entendimento das anomalias geoquímicas que podem estar relacionadas aos processos geológicos, físicos naturais e antropogênicos.

4.1 Sumário estatístico

Foram selecionados para o tratamento estatístico convencional (estatística univariada), inicialmente, os 53 elementos das amostras de sedimentos de corrente. Após a análise dos dados, os elementos que apresentaram baixo grau de detecção, ou seja, apresentaram amostras com o grau de detecção abaixo de 60%, foram desconsiderados para os tratamentos estatísticos multivariados e demais tratamentos de correlação (**Tabela 6**).

Tabela 6: Relação de elementos que apresentaram grau de detecção menor que 60%.

Número	Elementos	Grau de Detecção%
1	B (ppm)	28,29
2	Ge (ppm)	47,05
3	Pd (ppb)	44,02
4	Pt (ppb)	41,15
5	Re (ppb)	34,72
6	Ta (ppb)	23,30
7	Te (ppm)	59,76
8	W (ppm)	41,38

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Inicialmente, foi realizado o teste estatístico de normalidade, Shapiro-Wilk, para os dados brutos e log-transformados, e gerados histogramas que comprovaram a assimetria positiva dos dados brutos — fato que confirma que dados com distribuição normal raramente

são constatados em variáveis geoquímicas, principalmente quando se trata de dados constituídos por múltiplas populações (REIMANN *et al.*, 2008; GRUNSKY, 2010; LAPWORTH *et al.*, 2012).

Após a log-transformação, realizada com o objetivo de se obter melhores distribuições das variáveis, foram definidos os parâmetros estatísticos de cada variável, conforme resultados apresentados na **Tabela 7**. Nesta tabela são também apresentados os dados de concentração média da crosta superior (*Mean Upper Crust Concentration – UCC – RUDNICK et al.*, 2003), para efeito de comparação e de análise disponíveis na literatura.

Tabela 7: Sumário estatístico dos elementos.

Sumário Estatístico Geral — Dados Brutos									
Variáveis	Média	Mínimo	Q1 (25%)	Q2 (Mediana)	Q3 (75%)	Máximo	Assimetria	Curtose	UCC
Ag (ppb)	23,72	4,00	16,00	22,00	30,00	662,00	1,47	4,52	53
Al (%)	1,56	0,13	1,10	1,62	2,31	8,00	-0,54	0,82	8,15
As (ppm)	3,05	0,05	1,10	3,60	7,10	1665,00	-0,05	0,95	4,48
Au (ppb)	0,56	0,10	0,20	0,50	1,10	10097,40	1,55	4,52	0,0015
B (ppm)	3,94	0,50	1,00	10,00	10,00	24,00	-0,32	-1,64	17
Ba (ppm)	63,72	8,90	44,00	60,25	90,10	821,90	0,32	0,80	624
Be (ppm)	0,48	0,05	0,40	0,50	0,70	11,00	-0,59	2,02	2,1
Bi (ppm)	0,20	0,01	0,13	0,24	0,33	4,21	-0,67	1,13	0,16
Ca (%)	0,06	0,01	0,04	0,06	0,11	9,54	0,56	1,69	2,56
Cd (ppm)	0,03	0,01	0,02	0,03	0,04	0,81	0,34	0,53	0,09
Ce (ppm)	61,38	6,70	44,20	65,00	85,00	762,60	-0,04	1,96	63
Co (ppm)	7,58	0,20	4,10	7,50	13,20	321,70	0,17	0,66	17,3
Cr (ppm)	29,63	1,00	16,20	30,75	53,30	4808,70	0,11	0,69	92
Cs (ppm)	1,13	0,08	0,77	1,16	1,74	8,97	-0,40	0,84	4,9
Cu (ppm)	15,04	1,01	9,08	16,91	25,02	424,00	-0,36	0,44	28
Fe (%)	2,99	0,16	2,08	3,19	4,48	31,61	-0,38	1,29	3,52
Ga (ppm)	6,44	0,50	4,60	6,80	9,40	30,80	-0,75	1,44	17,5
Ge (ppm)	0,07	0,05	0,05	0,05	0,10	0,40	0,57	-0,42	1,4
Hf (ppm)	0,14	0,01	0,09	0,14	0,23	2,05	-0,10	0,54	5,3
Hg (ppb)	18,93	0,25	13,00	21,00	30,00	2136,00	-1,10	6,20	50*
In (ppm)	0,03	0,01	0,02	0,03	0,04	0,24	0,10	-0,31	0,056
K (%)	0,08	0,01	0,06	0,08	0,12	0,69	-0,07	0,35	2,32
La (ppm)	23,94	3,20	16,40	24,20	34,20	376,80	0,26	1,24	31
Li (ppm)	5,99	0,30	4,40	6,30	8,70	44,40	-0,64	1,68	21
Mg (%)	0,05	0,01	0,03	0,05	0,07	0,65	0,25	0,93	1,49
Mn (ppm)	380,13	16,00	193,00	344,50	686,00	7841,00	0,43	0,29	774
Mo (ppm)	0,42	0,04	0,24	0,35	0,56	10,22	1,37	2,04	1,1
Na (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,07	0,42	0,28	0,05
Nb (ppm)	0,24	0,02	0,15	0,23	0,37	2,80	0,25	0,22	12
Ni (ppm)	10,11	0,50	5,60	9,70	16,20	387,70	0,47	0,75	47
P (%)	0,03	0,00	0,02	0,03	0,04	0,41	0,00	1,75	0,067*
Pb (ppm)	16,46	1,77	12,62	17,06	21,92	215,33	-0,35	2,26	17
Pd (ppb)	8,45	5,00	5,00	5,00	10,00	245,00	1,56	2,08	0,52
Pt (ppb)	1,53	1,00	1,00	1,00	2,00	25,00	1,37	1,44	0,5
Rb (ppm)	11,42	1,30	8,90	12,50	16,40	52,40	-1,05	1,76	84
Re (ppb)	0,65	0,50	0,50	0,50	1,00	4,00	1,05	0,26	0,198
S (%)	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	3,08	0,85	3,28	0,0621*
Sb (ppm)	0,23	0,01	0,06	0,36	0,61	26,12	0,03	-0,31	0,4
Sc (ppm)	3,40	0,20	2,30	3,50	5,20	26,00	-0,48	1,25	14
Se (ppm)	0,16	0,05	0,10	0,20	0,30	20,40	0,27	0,94	0,09
Sn (ppm)	1,04	0,10	0,70	1,00	1,60	11,30	-0,07	0,46	2,1
Sr (ppm)	7,49	0,80	4,80	7,30	10,90	506,10	0,87	2,84	320
Ta (ppm)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	1,26	-0,40	0,9
Te (ppm)	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,18	0,70	-0,34	0,001
Th (ppm)	8,70	0,60	5,70	7,70	13,10	190,80	0,58	1,36	10,5
Ti (%)	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,19	0,47	-0,14	0,38
Tl (ppm)	0,16	0,02	0,11	0,16	0,23	1,12	-0,19	0,70	0,9
U (ppm)	1,60	0,10	1,10	1,50	2,40	15,90	0,20	1,13	2,7
V (ppm)	32,16	1,00	21,00	34,00	52,00	245,00	-0,68	1,35	97
W (ppm)	0,07	0,00	0,05	0,05	0,10	14,80	3,23	22,64	1,9
Y (ppm)	7,97	0,61	5,48	8,50	12,49	58,80	-0,66	1,01	21
Zn (ppm)	27,88	1,30	20,20	28,80	39,20	588,50	-0,28	3,17	67
Zr (ppm)	6,88	0,30	4,40	6,80	11,00	78,80	-0,29	1,21	193

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

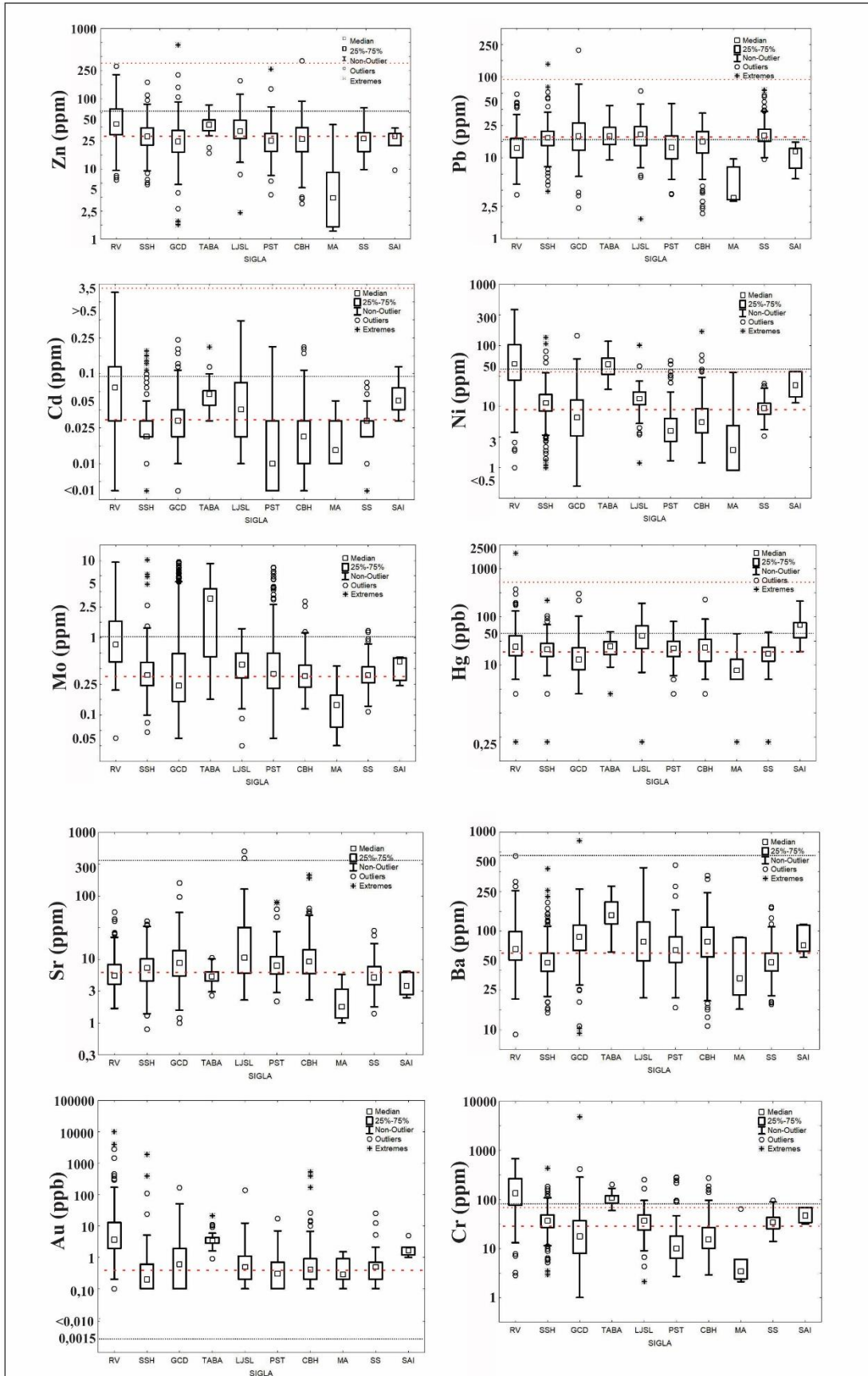
* Dado Hg, em ppm, transformado em ppb; e P, originais em ppm, transformado em %.

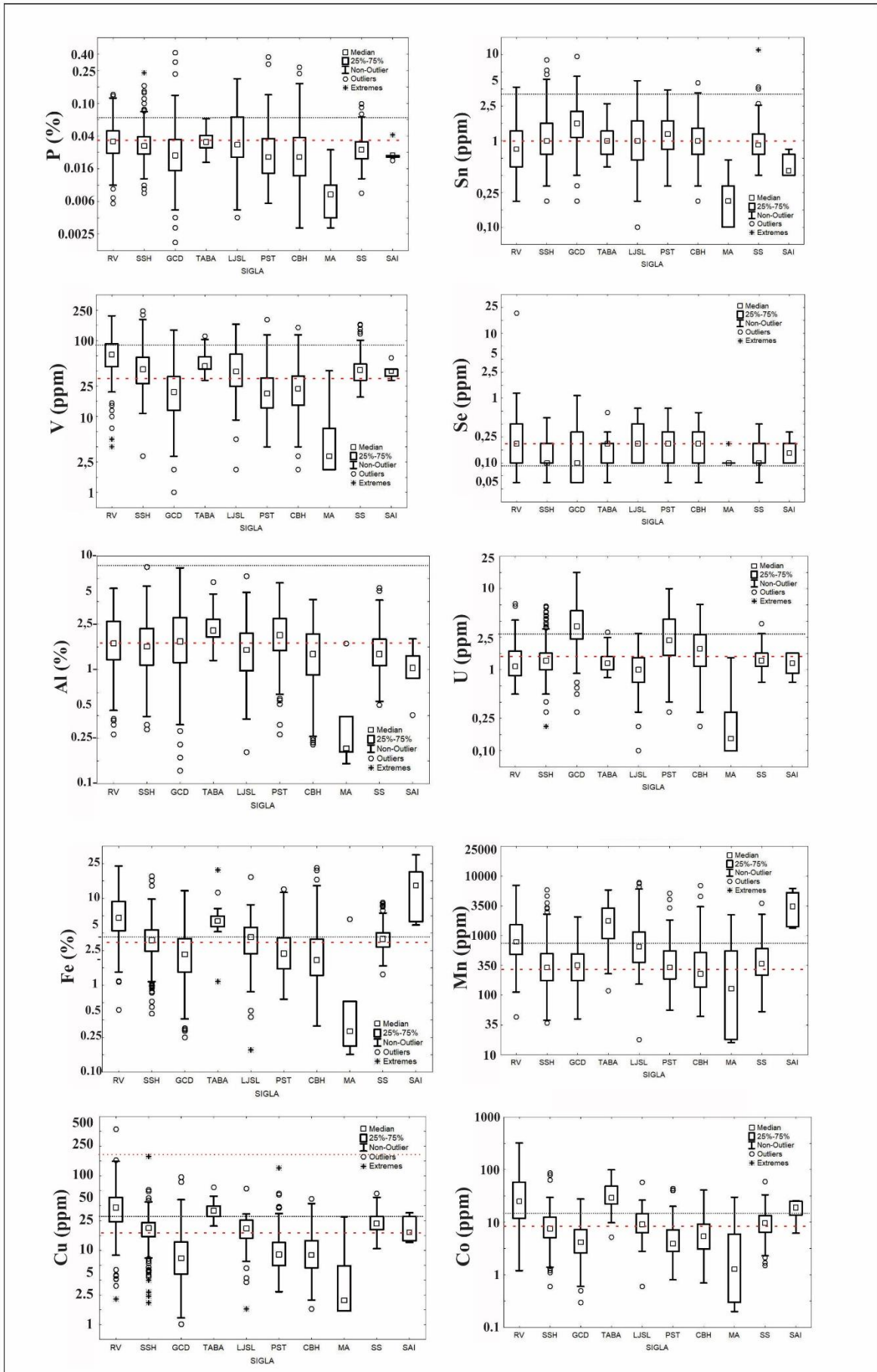
Após a análise global dos dados, foi realizada uma análise da distribuição das variáveis pelos compartimentos geológicos e, a partir dos resultados obtidos, nos casos que não apresentaram uma correlação direta com a variabilidade geológica, buscou-se localizar e identificar a existência de alguma relação com o uso e a ocupação. Cada unidade geológica presente na área estudada apresenta diferentes faixas de concentração dos elementos analisados, resultados que destoem dessa variabilidade natural podem ocorrer devido à associação com atividades que disponibilizam esses elementos de forma acelerada, seja ela de forma natural, tais como: um desastre natural e/ou por ações causadas por atividades antrópicas. A abordagem por variabilidade geológica pode retratar de maneira mais fidedigna as variações de *background* geoquímico da área de estudo.

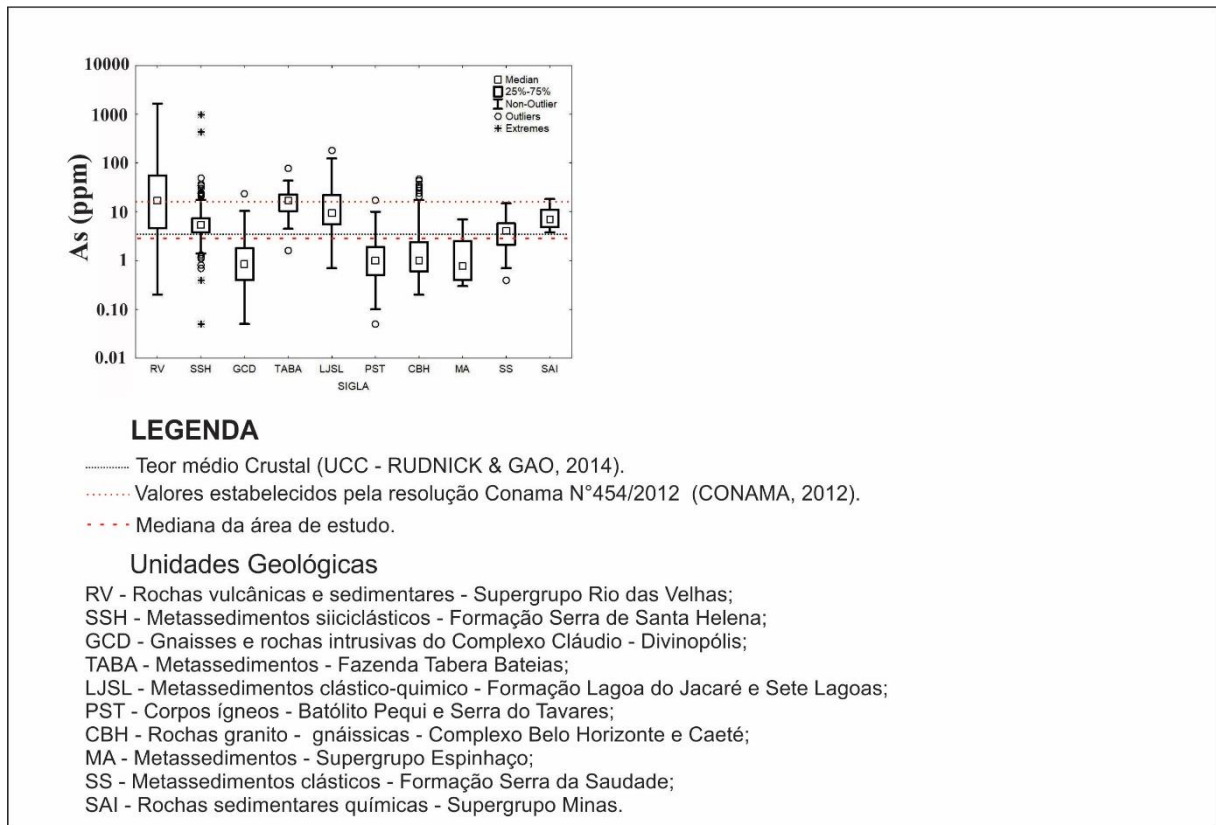
A análise estatística dos compartimentos geológicos se deu pela divisão espacial das 10 unidades geológicas estabelecidas. As características de cada unidade geológica influenciam diretamente no comportamento geoquímico dos 21 elementos analisados e selecionados como prioritários. A seleção destes elementos se deu pela sua importância econômica e ambiental, sendo alguns fundamentais para as funções vitais, e outros nocivos à saúde.

Mesmo após a separação por unidades geológicas, nota-se que as variáveis apresentam subpopulações em suas distribuições, explicadas pela diversidade litológica dentro das próprias unidades, conforme gráficos da **Figura 9**:

Figura 9: *Boxplots* apresentando a variabilidade dos elementos dentro das unidades geológicas.







Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Buscando identificar faixas de concentração de *background* (entre limiares inferiores e superiores), representado pelo valor mediano dos *boxplots*, é importante levar em consideração que determinados elementos possuem fontes distintas, que podem ser de: unidades geológicas diferentes; processos hidrotermais; ou mesmo de contaminação por fontes antrópicas. Desta forma, a concentração de *background* (ou mediana) de um elemento pode possuir valores distintos de uma unidade para outra (**Figura 9**).

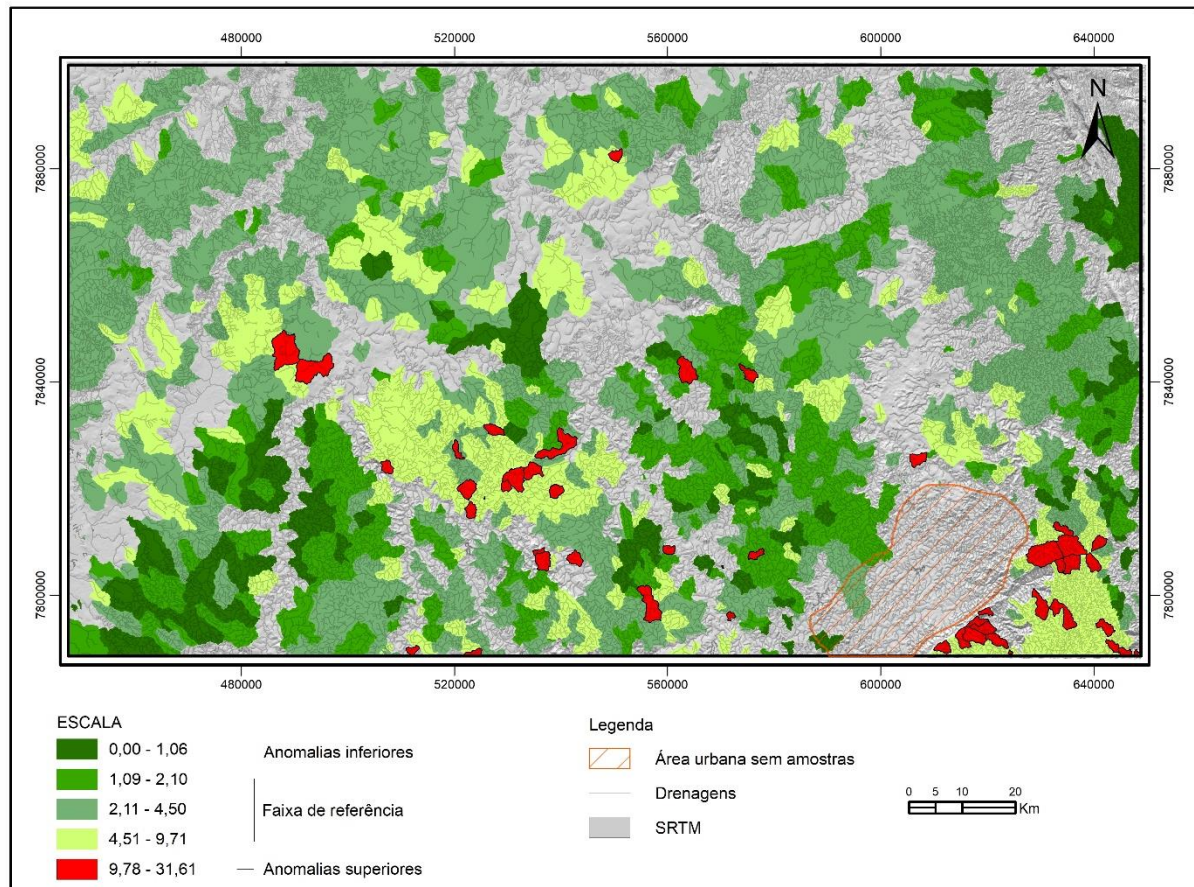
Nos *boxplots* foram, também, representados os teores médios crustais (UCC) dos elementos e, quando existentes, as concentrações de determinados elementos estabelecidos pela Resolução CONAMA N°454/2012. Baseando-se, principalmente, no guia de qualidade dos sedimentos canadenses com indicação dos prováveis valores de concentração de elementos que acarretam efeitos adversos na biota (CCME, 2002). Com base nessas informações, podemos observar as discrepâncias dos valores médios da região de estudo e quão importante é estabelecer parâmetros de referências levando em consideração a variabilidade regional.

As faixas de *background* para os elementos (As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Mo, V, Zn) são mais representativas nas unidades do Supergrupo Rio das Velhas (RV), na qual ocorrem as conhecidas mineralizações de Au na região do Quadrilátero Ferrífero. Tais elementos são

comumente carregados por fluidos hidrotermais juntamente com elementos, como: Ag, As, Sb, Pb e Zn (BORBA, 2000). Tal fato pode, também, ser corroborado pelas afinidades geoquímicas apresentadas no Correlograma (**Figura 14**).

O Fe, pela sua baixa mobilidade em ambientes oxidantes, geralmente apresenta suas altas concentrações próximas às áreas fonte, como pode-se observar na distribuição do *boxplot*, onde as maiores faixas de *background* desse elemento são apresentadas não somente pelas unidades do RV, mas também relacionadas às unidades dos Grupos Sabará e Itabira (Supergrupo Minas – SAI), conforme **Figura 10**. O Mn apresenta um comportamento semelhante ao Fe quando se trata da sua representatividade nas unidades geológicas, pois ambos estão presentes nas formações ferríferas bandadas (BIF's).

Figura 10: Mapa de distribuição do Fe (%) pelo método MAD.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O P apresenta concentrações de *background* (representados pela mediana) aproximadas entre as unidades metassedimentares: Fazenda Tapera/Bateias (TABA), RV, Formações Lagoa do Jacaré e Sete Lagoas (LJSL), e Formação Serra de Santa Helena (SSH) — sendo que, nesta última unidade, é possível notar um grande número de *outliers*, o que é coerente, pois

representam ocorrências sedimentares de fosfato. Os maiores valores absolutos deste elemento podem ser vistos nas unidades complexos gnáissico-migmatítico, Cláudio/Divinópolis (GCD), o que pode estar relacionado com a presença de apatita, que ocorre como mineral acessório em diversas rochas ígneas (DUARTE, 1982). Contudo, concentrações significativas de P podem estar associadas às contaminações por atividades antrópicas, principalmente relacionadas com a agricultura, conforme apresentado na **Figura 13**.

Assim como o P, o Al apresenta suas concentrações medianas aproximadas nas unidades metassedimentares, TABA e RV, e nos corpos ígneos representados pelas unidades Batólito Tavares/Batólito Pequi (PST) e GCD. Os maiores valores absolutos para o Al ocorrem tanto nas unidades SSH como GCD, conforme mostrado no **Anexo B**. A ocorrência de alumínio em sedimentos está relacionada ao intemperismo de rochas de graníticas e gnáissicas, tal como as encontradas na área de estudo.

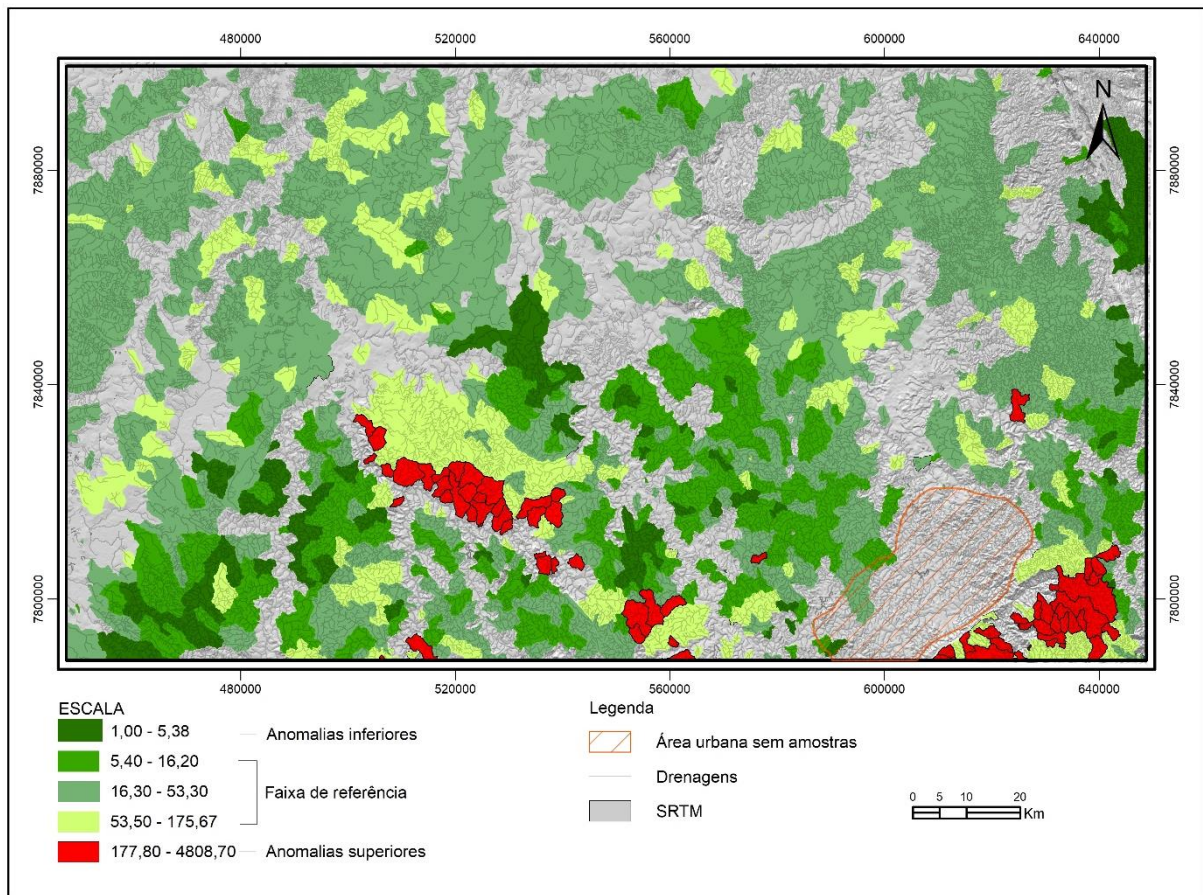
O As ocorre, em destaque, nas rochas vulcano-sedimentares do RV e representam a influência das mineralizações de Au em depósitos sulfetados do Quadrilátero Ferrífero — em especial, as mineralizações arqueanas do Grupo Nova Lima (RV).

Concentrações elevadas de As em solos superficiais e em sedimentos argilosos, quando comparados às concentrações em rochas originárias, podem refletir fontes externas do elemento provenientes de exalações vulcânicas e de poluição. Em solos não contaminados, a concentração total do elemento limita-se a 10 mg/kg, excedendo com raras exceções.

O Cd apresenta os maiores valores medianos (representativos do *background*) para as unidades metassedimentares: RV, TABA, SAI e LJSJ. Tal evidência pode ser explicada pela presença de litotipos carbonáticos em tais unidades, as quais possuem afinidade com este elemento. No sistema carbonato, há a possibilidade de substituição de Ca e Mg por Cd e Sr, na estrutura dos minerais calcita e dolomita (KRAUSKOPF, 1995).

O Cr (**Figura 11**), o Zn e o Ni, apresentam suas faixas de *background* bem representadas nas rochas da unidade RV; contudo, mostram altas anomalias positivas para GCD e CBH, o que pode estar relacionado aos diques máficos encontrados por todo embasamento ou às lascas de *greenstone belts* dentro do embasamento granito-gnáissico (SILVA *et al.*, 2021). Possíveis fontes antropogênicas também podem ser associadas ao Zn e Ni, apresentando possibilidade de contaminação na área estudada. Tais elementos podem estar associados aos resíduos sólidos, na indústria siderúrgica, nos municípios de Sete lagoas e Vespasiano (OLIVEIRA & MARTINS, 2003).

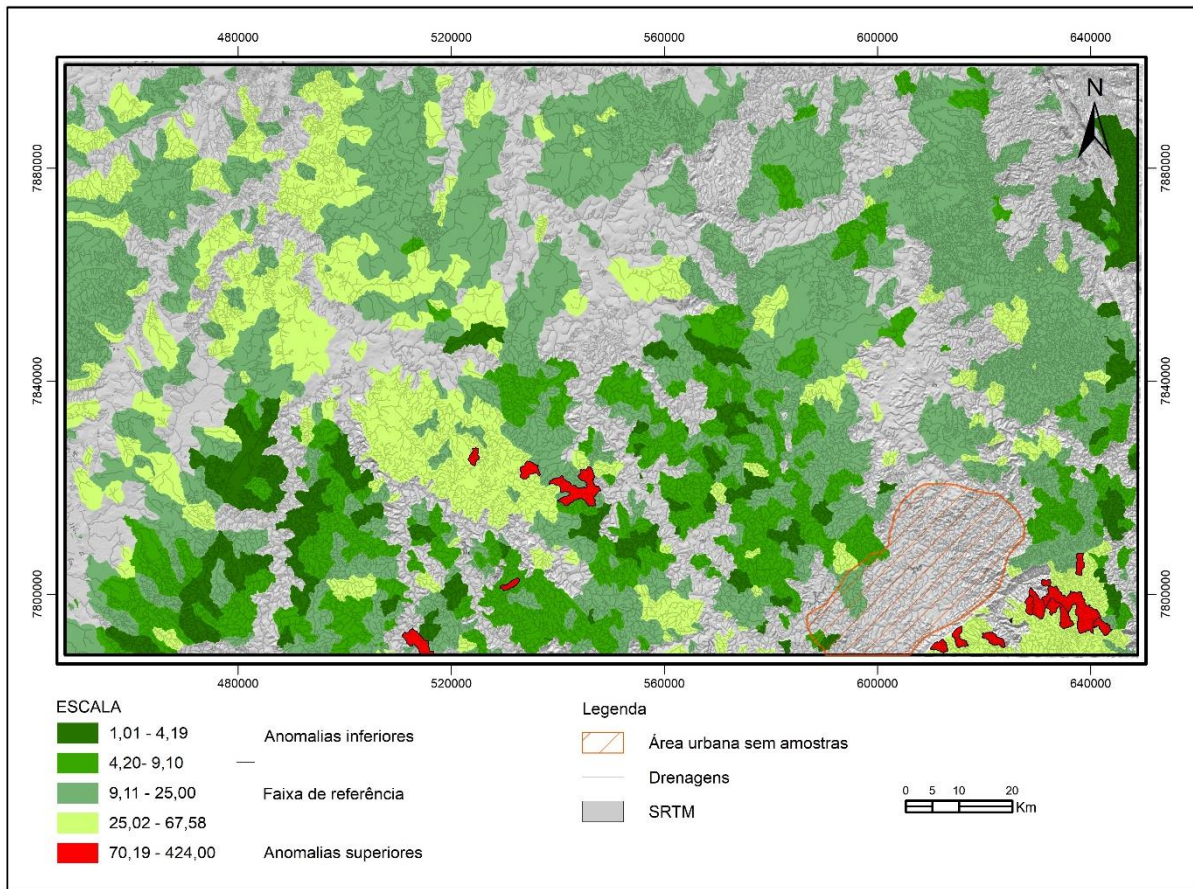
Figura 11: *Background* do Cr (ppm) pelo método MAD.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O Pb apresenta maiores valores medianos entre as rochas das unidades: GCD, TABA, LJSL, SSH e SS — com os maiores valores de concentração para GCD e SSH. O Cu, assim como outros elementos já descritos, possui suas maiores concentrações medianas nas unidades RV e TABA, e apresenta maiores valores absolutos para RV. Os valores anômalos para o Pb, o Cu (**Figura 12**) e outros elementos, deve ser estudado de forma mais aprofundada, pois tais concentrações podem estar relacionadas a diferentes faciologias das próprias unidades geológicas, bem como representar processos hidrotermais ou até mesmo contaminação relacionada com a atividade antropogênica.

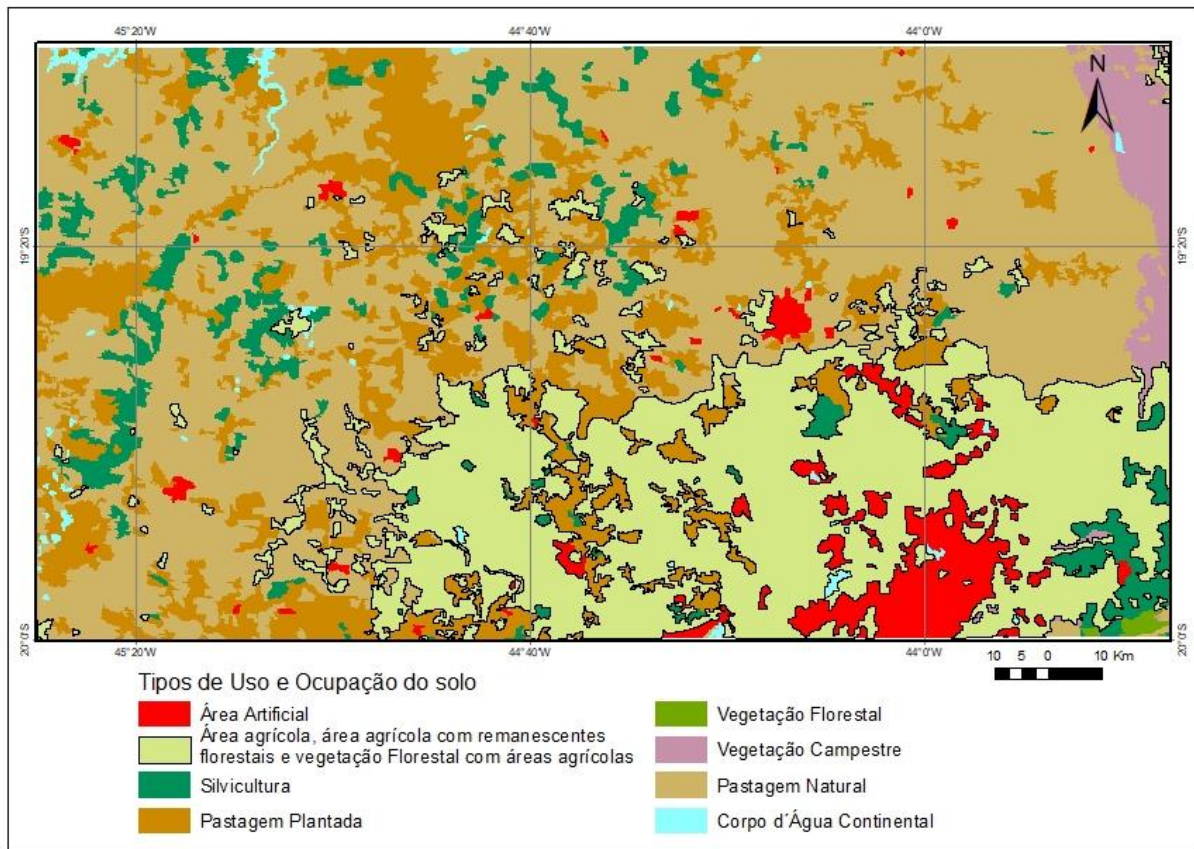
Figura 12 : *Background* do Cu (ppm) pelo método MAD.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Ba apresenta valores de *background* mais altos para GCD e TABA, com as maiores concentrações absolutas para o GCD, SSH e RV. As altas concentrações relacionadas ao GDC podem estar atreladas às rochas graníticas, como nas rochas descritas por Marcussi (2022), que descreve o sulfato de bário associado a minerais opacos nos granitoides da Suíte Alto Maranhão. Oliveira (2004) apresenta, em seu trabalho, uma tabela com resultados geoquímicos realizados em amostras dos gnaisses Cláudio e, nesta tabela, o Ba possui valores entre 373 e 856 ppm, corroborando os resultados apresentados neste estudo.

Figura 133: Destaque das áreas de influência agrícola do mapa.



Fonte: Modificado do Mapa de Cobertura e Uso da Terra do Brasil, 2010. (IBGE, 2010).

4.2 Estatística Bivariada

Como discutido anteriormente, os dados geoquímicos trabalhados não apresentam uma distribuição normal, portanto, os testes estatísticos a serem utilizados devem ser não paramétricos.

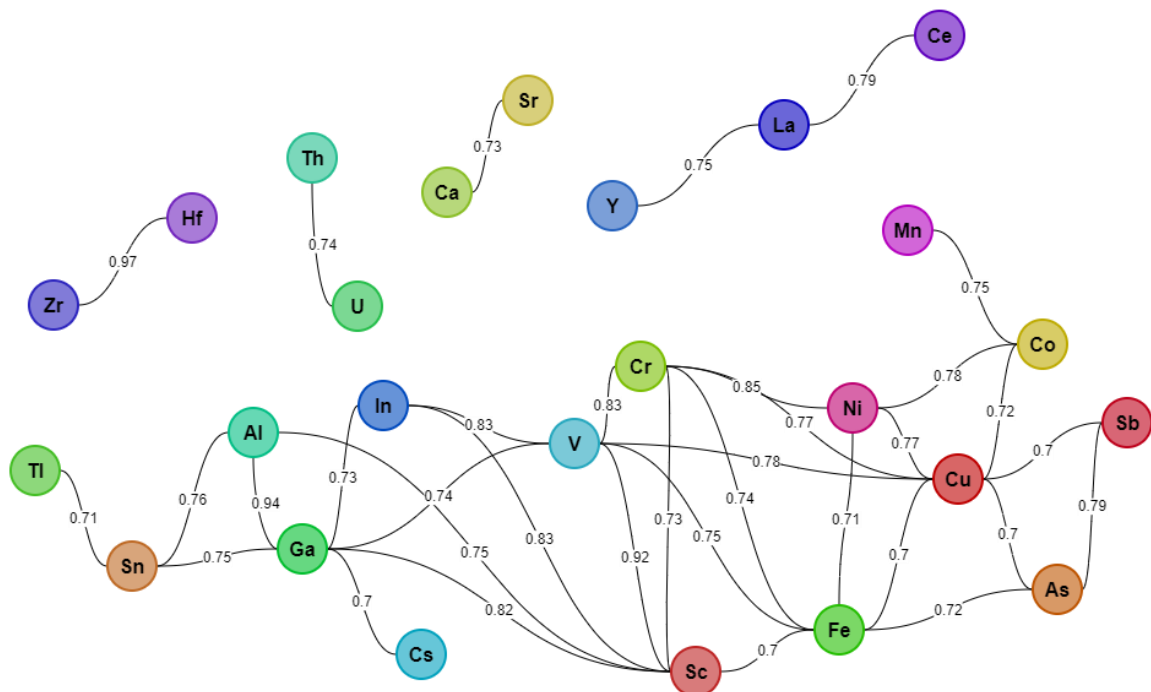
A estatística bivariada representa a relação de um elemento com outro, e uma das formas de mostrar essa relação é através da sua representação por uma matriz de correlação.

Na análise de correlação, existe a opção da Correlação de Pearson (estatística paramétrica) e da Correlação de Spearman (estatística não-paramétrica). Portanto, considerando as características de distribuição dos dados geoquímicos, foi realizada a Correlação de Spearman, a um nível de significância de 0,05 (**Tabela 8**).

Após a obtenção dos coeficientes de correlação, realizou-se uma formatação condicional dos dados, onde aqueles que apresentam correlação entre 0,99 e 0,80 indicam uma alta correlação; entre 0,79 e 0,65, uma média correlação; entre 0,64 e 0,45, uma baixa correlação; e inferior a 0,44, muito baixa correlação.

A partir da matriz de correlação, foi gerado um correlograma que mostra a correlação e a afinidade geoquímica entre os elementos de forma gráfica (CAMPOS & LICHT, 2021), considerando o valor mínimo de correlação de 0,70 (**Figura 14**).

Figura 14: Correlograma de afinidade geoquímica dos elementos.



Fonte: Elaborado pela autora, através do aplicativo online: EZCORRGRAPH (*Easy Correlation Graph*). Disponível em: <<https://ezcorrgraph.firebaseio.com/>>. Acesso em: 15 jun. 2022.

Pode ser observado que alguns elementos possuem altos valores de correlação, principalmente por suas afinidades geoquímicas, como no caso dos pares, Zr e Hf, Th e U, Ca e Sr; ou em grupo maiores, tais como Ce, La e Y; e mesmo em grandes grupos, como Ti, Sn, Al, Ga, In, Cs, V, Cr, Sc, Fe, Ni, Cu, As, Sb, Co e Mn.

Esses grandes grupos podem indicar associações com tipos litológicos, como no caso do Ni, Cr, Cu, Co e Fe, que podem estar relacionados com as rochas máficas e ultramáficas na área em questão, representadas pelas rochas do Supergrupo Rio das Velhas.

O Al e o Ga apresentam uma grande afinidade por seu raio iônico possuir um tamanho aproximado (PINHO *et al.*, 2017). Normalmente, em perfis lateríticos, o Ga pode ocorrer em associação com o Al e o Fe, associados à gibbsita e às caulinitas, dependendo de condições físico-químicas do meio (GOLDSCHMIDT, 1954).

Alguns outros pares de elementos com boas correlações, tais como, Hf / Zr, Th / U / Bi e Cr / Sb, possuem associações entre si por possuírem raios iônicos semelhantes (CARVALHO, 1995).

Os elementos La, Y, Cd e Sr podem estar associados a litotipos carbonáticos, pela semelhança dos seus raios iônicos com os raios iônicos do Ca e do Mg. Elementos terras-raras, com concentrações consideráveis, podem ser encontrados em carbonatos; assim como Cd e Sr podem ocorrer em substituição do Ca e do Mg, na estrutura dos minerais calcita e dolomita (ROLLINSON, 1993; KRAUSKOPF, 1995).

4.3 Cálculo do *background* por TIF e MAD e análise fractal

Os resultados obtidos no cálculo do *background*, para este trabalho, apresentaram diferenças significativas entre os métodos aplicados.

Para os três métodos utilizados, pode-se verificar uma tendência decrescente dos resultados na maioria dos 21 elementos. Ou seja, resultados do *background*: TIF > MAD > FRACTAL (Tabela 9).

Tabela 9: Tabela comparativa dos valores de *background* por diferentes métodos.

ELEMENTOS	Mediana +2MAD	Mediana -2MAD	TIF (LIM. SUP.)	TIF (LIM. INF.)	FRACTAL
Al (%)	4,84	0,54	7,03	0,36	1,29
As (ppm)	50,97	0,25	116,45	0,07	3,70
Au (ppb)	7,57	0,03	14,19	0,02	0,50
Ba (ppm)	169,47	21,42	264,39	14,98	42,40
Cd (ppm)	0,10	0,01	0,11	0,01	0,03
Co (ppm)	43,79	1,28	76,26	0,71	5,70
Cr (ppm)	175,67	5,38	318,05	2,71	23,90
Cu (ppm)	68,40	4,18	114,45	1,99	17,20
Fe (%)	9,71	1,05	14,16	0,66	2,90
Hg (ppb)	69,87	6,31	105,17	3,71	16,00
Mn (ppm)	2189,50	54,21	4595,68	28,81	254,98
Mo (ppm)	1,22	0,10	2,00	0,07	0,25

Ni (ppm)	46,44	2,03	79,70	1,14	8,90
P (%)	0,08	0,01	0,11	0,01	0,02
Pb (ppm)	38,06	7,65	50,16	5,52	16,20
Se (ppm)	1,56	0,03	1,56	0,02	0,10
Sn (ppm)	2,88	0,35	5,53	0,20	0,90
Sr (ppm)	25,29	2,11	37,30	1,40	6,90
U (ppm)	4,99	0,45	7,73	0,34	0,90
V (ppm)	123,64	9,35	202,63	5,39	37,92
Zn (ppm)	76,28	10,87	105,96	7,47	26,60
				Maiores resultados	

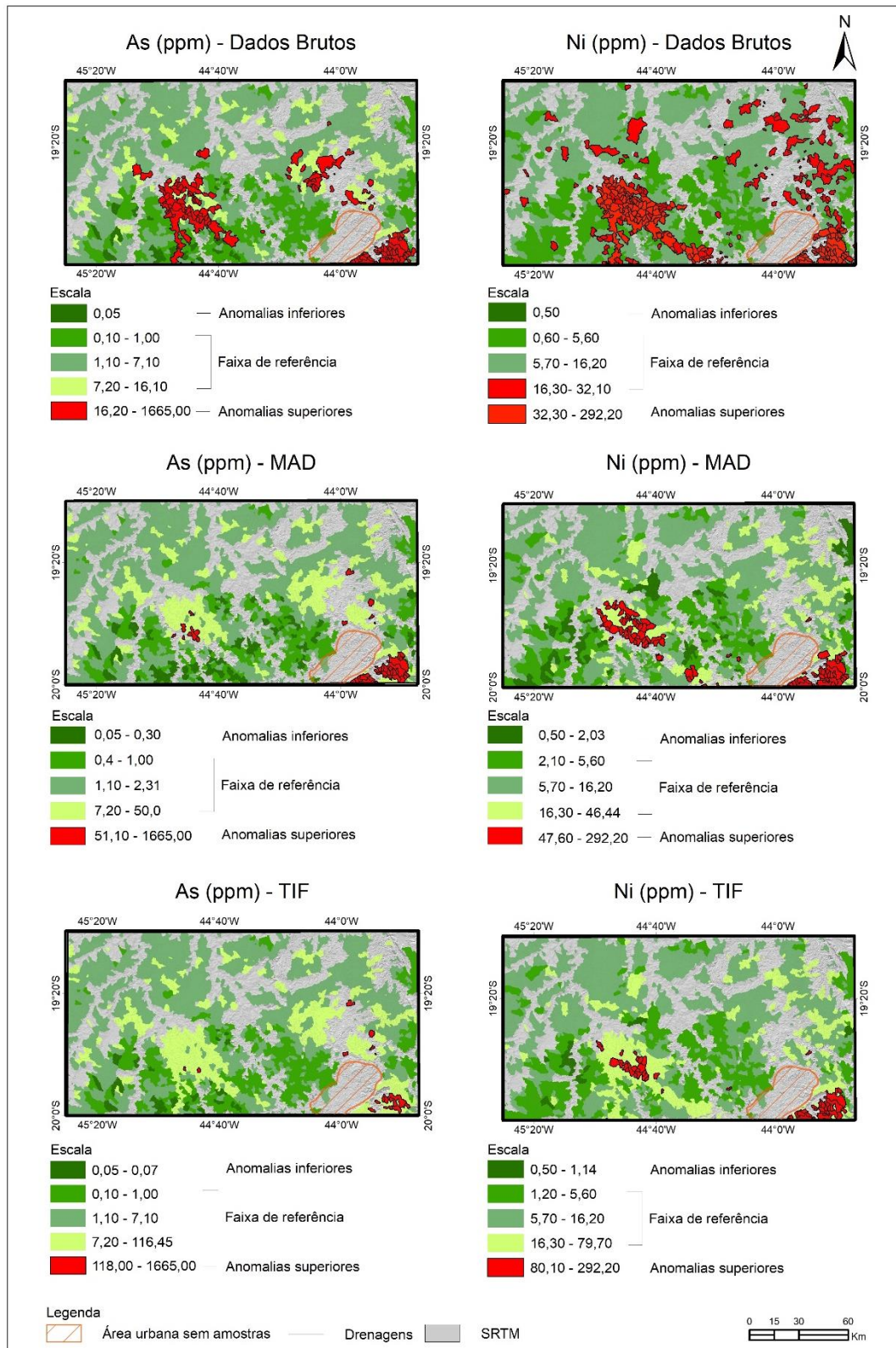
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

A escolha do método de definição de *background* geoquímico deve ser realizada de forma criteriosa, pois dependendo da escolha, pode-se, por exemplo, deixar os valores de limiares superiores muito altos, impossibilitando a identificação de resultados que possam indicar um tipo de contaminação; ou deixar tal limite muito baixo, de forma a considerar concentrações muito baixas como anomalias.

O método fractal utiliza-se da variabilidade espacial de valores geoquímicos em relação ao número de amostras, e apresentou resultados baixos quando comparados aos demais métodos (**Anexo A**). Os métodos MAD e TIF são considerados representativos e utilizados para definir o *background* ou fundo ambiental (REIMANN *et al.*, 2005; REIMANN & CARITAT, 2005, 2017). Contudo, o método TIF é descrito na literatura como um método representativo do fundo mineralizado (PALUMBO-ROE *et al.*, 2016), e, para o presente estudo, tal método apresentou resultados com limiares elevados. Dessa forma, optou-se por considerar como resultado aplicável para a área de estudo o método MAD — por ser uma técnica robusta e mostrando ser mais conservadora do que as demais, tende a não superestimar anomalias positivas, e nem subestimar anomalias positivas como o método TIF (**Figura 15**).

O TIF apresentou valores muito elevados para a maioria dos elementos, o que poderia desconsiderar possíveis casos de áreas contaminadas ou com enriquecimento natural, considerando-as dentro de uma faixa de *background*. De forma oposta, a técnica fractal deixaria muitos valores acima do limiar superior, ou seja, classificando muitas áreas como enriquecidas naturalmente ou contaminadas.

Figura 15: Mapa geoquímico de definição de *background* (As e Ni (ppm)). Comparação entre os métodos MAD, TIF e dados brutos.

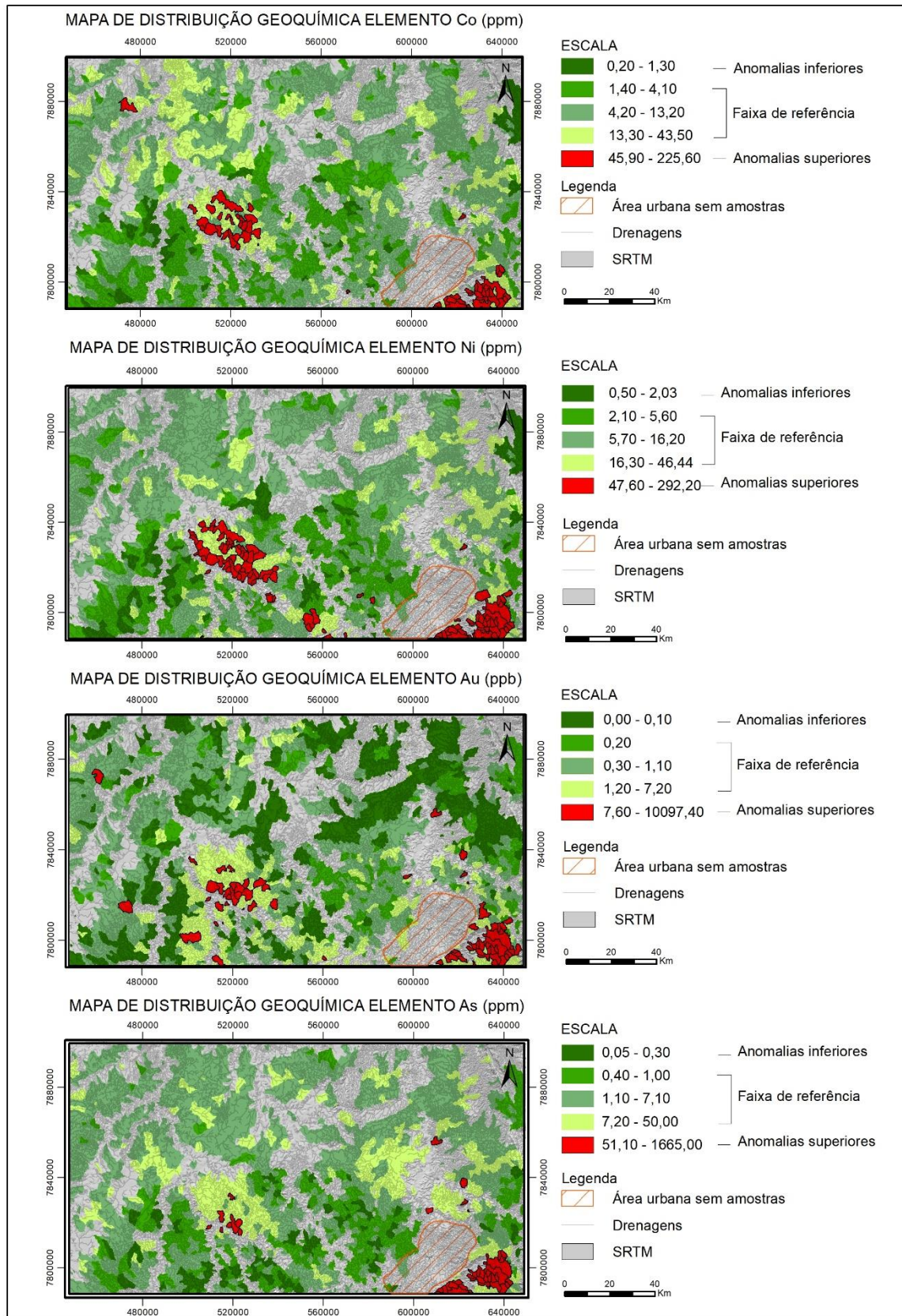


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Observa-se que, para vários elementos analisados, ocorre um padrão de distribuição espacial intimamente relacionado com as variações litológicas e as afinidades geoquímicas entre eles (**Figura 16**). Portanto, independentemente do método utilizado, deve-se usar de maneira criteriosa a definição de *background* geoquímico, tendo como referência principal as unidades geológicas e/ou geotectônicas para grandes áreas, uma vez que há, claramente, significantes variações de concentração dos elementos químicos nos diferentes litotipos considerados. Além disso, tal procedimento facilita levantar hipóteses sobre possíveis influências antropogênicas sobre a concentração dos elementos.

A exemplo dessa característica, o mapa de distribuição de Co, Ni, Au e As (**Figura 16**), além dos elementos Cd, Cu, Mn e Fe, apresentam valores anômalos nas rochas vulcanossedimentares do Supergrupo Rio das Velhas (RV), e podem representar depósitos e ocorrências minerais já conhecidas na região. Entretanto, também são observadas anomalias pelas quais não se identifica uma origem geogênica, podendo estar associadas com as interferências antrópicas.

Figura 16: Mapas de distribuição geoquímica (*background*) dos elementos Co, Ni, Au e As, pelo método MAD.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

4.4 Índices ambientais

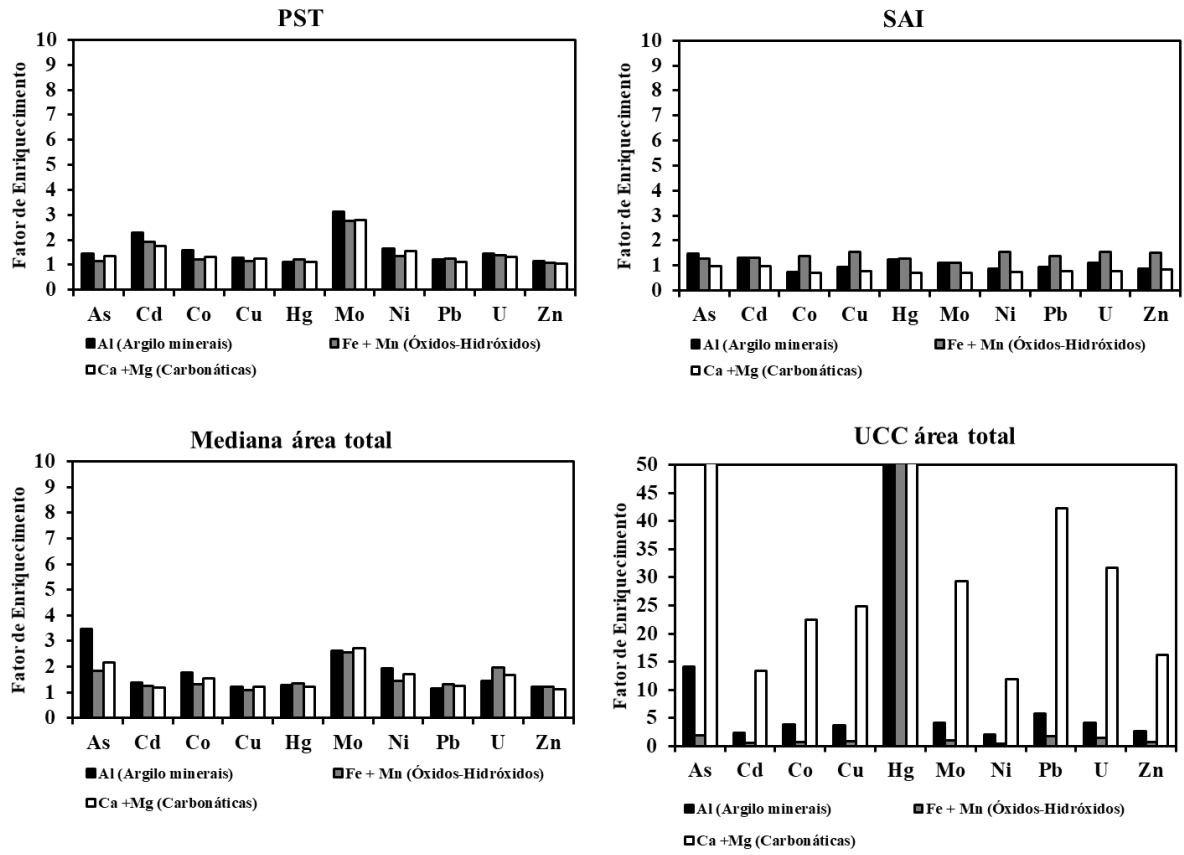
Dentre os 21 elementos, optou-se por 10 (As, Cd, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, U e Zn) para efetuar o tratamento para os índices ambientais, devido ao grande potencial de toxicidade e por registros de ocorrências e depósitos destes elementos na região. Inicialmente, o tratamento ocorreu com os dados de toda área, sendo verificada uma grande concentração de anomalias distribuídas pela área de estudo e, também, grandes concentrações anômalas em regiões mais específicas — isso foi observado para o FC, FE, RE, PLI e GCm, conforme mostram as **Figuras 22, 23 e 24**. Dessa forma, optou-se pelo tratamento e pela representação cartográfica, considerando os valores de referência por unidade geológica.

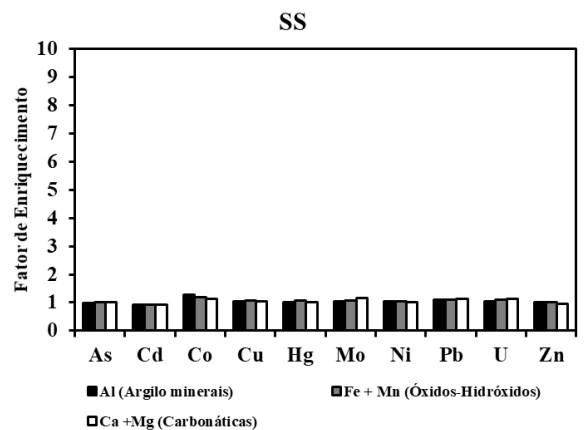
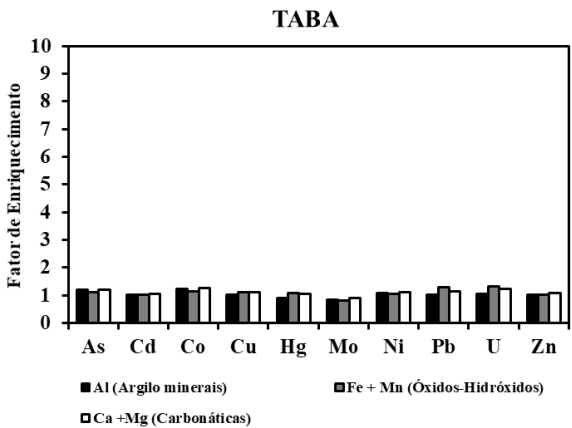
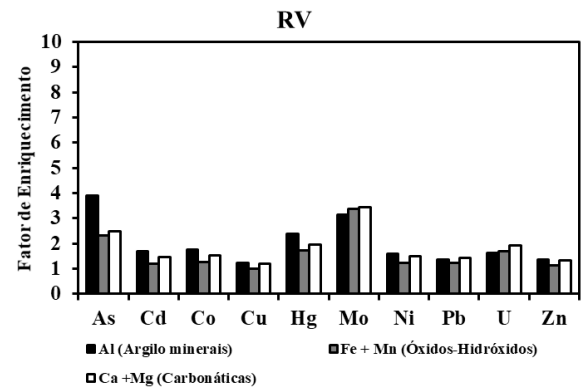
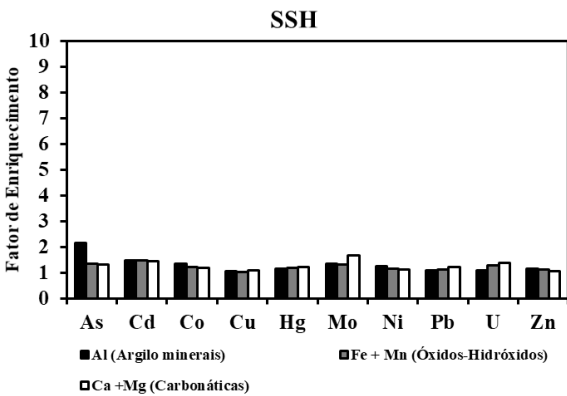
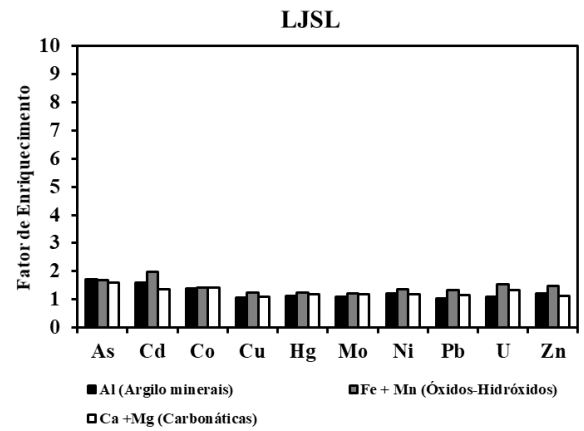
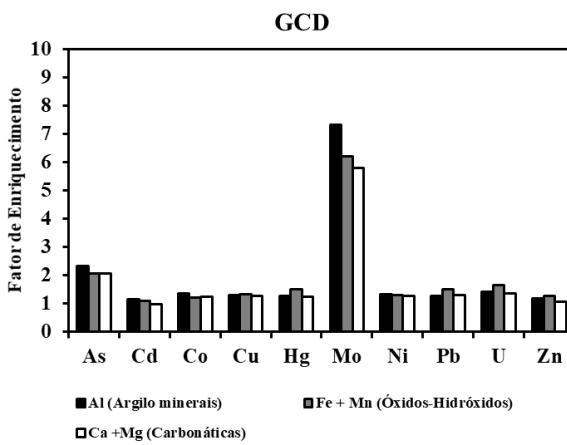
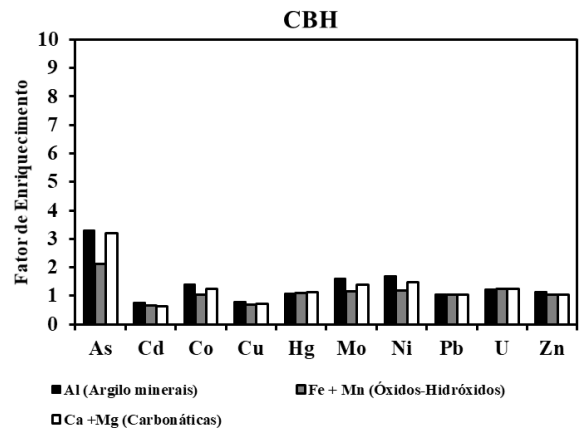
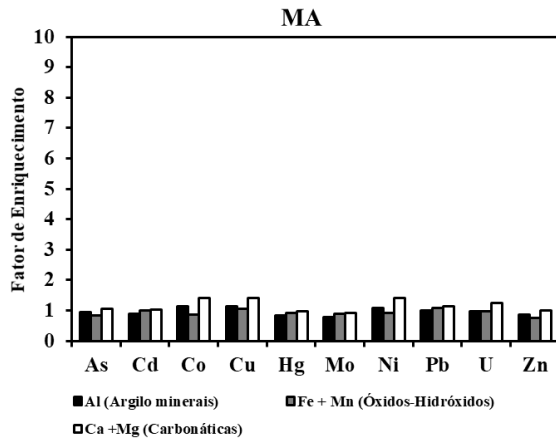
Como já apresentado, o Fator de Enriquecimento (FE) foi calculado com base em 3 normalizadores distintos (os elementos Al, Fe + Mn e Ca + Mg, que representam, respectivamente, as fases de argilominerais, óxidos-hidróxidos e carbonatos), comumente utilizados devido sua abundância na crosta. Além disso, tais elementos são considerados importantes agentes de adsorção na natureza, possuindo grande afinidade com elementos-traço (TAN *et al.*, 2005; JONSSON *et al.*, 2006). É válido ressaltar que foram testados 3 valores de referência (*backgrounds*) para os cálculos dos índices ambientais, a saber: 1) valores do UCC; 2) *background* (mediana) calculado para a área de estudo; e 3) *background* (mediana) calculado para cada uma das unidades geológicas consideradas.

Comparando os elementos analisados neste estudo com UCC (**Tabela 8**), apenas Cd e Pb têm concentrações acima de tais valores de referência. Portanto, utilizar os valores de UCC como referência subestimaria os fatores de enriquecimento, sendo utilizados, assim, os valores do *background* obtidos para a área inteira e para as unidades geológicas.

De maneira geral, não foram apresentadas variações muito discrepantes entre os tipos de normalizadores quando o tratamento foi realizado, considerando os valores de referência por unidades geológicas (**Figura 17**); contudo, podemos verificar que a utilização do normalizador Al apresenta uma favorabilidade nas unidades PST, CBH, RV e GCD. Os resultados do FE para os elementos As, Cd, Co, Hg e Zn, apresentaram valores um pouco mais elevados quando utilizado o normalizador Al, ou seja, os minerais de argila se mostram os melhores carreadores destes elementos. Para os elementos Cu, Mo e Ni, estes mostraram maiores valores de FE para Ca + Mg, ou seja, afinidades com matriz carbonática; enquanto que Pb e U se apresentam com maior afinidade aos óxidos-hidróxidos (Fe + Mn). (**Anexo D**).

Figura 17: Gráficos da média dos FEs, utilizando como referência as medianas por unidade geológica, bem como medianas e UCC para área total pelos normalizadores (Al, Fe + Mn e Ca + Mg).





Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

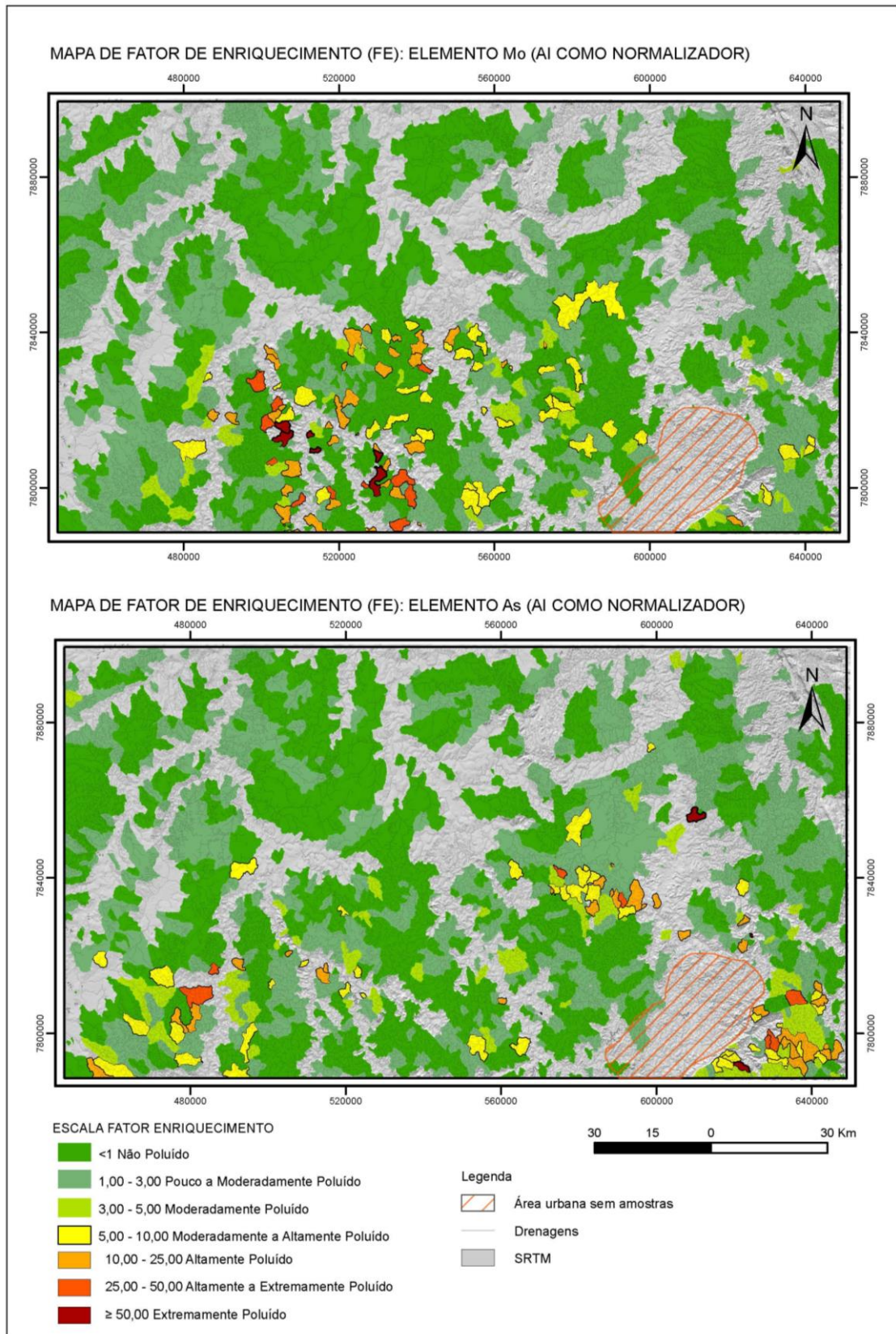
Ainda analisando os gráficos com os valores médios de FE (**Figura 17**), há uma tendência nos valores para alguns metais relacionados à variabilidade litológica. Como exemplo, têm-se as unidades RV, CBH, GCD e PST, que apresentam enriquecimento moderado (entre 3 e 5) para As; assim como o Mo, para as unidades RV e PST; enquanto a unidade GCD ganha destaque ao atingir valores médios de FE > 5 para Mo. Tem-se, ainda, o enriquecimento moderado, também, para Hg, na unidade RV. Dentre esses destaques nos valores de FE, o argilomineral é o principal carreador de metais nessas unidades.

Considerando a distribuição dos valores de FE ao longo da área de estudo, As, Hg e Mo (**Figura 18**) apresentaram microbacias com valores ≥ 50 , ou seja, classificando-as como “extremamente poluídas”. Para As e Hg, a maior parte das microbacias com altos valores de FE encontram-se em regiões relacionadas a rochas naturalmente enriquecidas nestes elementos, mais precisamente nos litotipos do Supergrupo Rio das Velhas. Já para o Mo, este pode ser associado às rochas graníticas gnáissicas do Complexo Cláudio Divinópolis e Belo Horizonte; contudo, os altos valores de FE (comparados aos demais EPTs) podem sugerir alguma fonte antropogênica para tal metal.

Os elementos As, Cd, Co, Cu, Hg, Zn, U, Ni e Mo apresentaram microbacias com valores entre 10 e 25, sendo classificados como “altamente poluídas”. Todos os 10 elementos analisados pelo FE apresentaram, ao menos, 1 microbacia com valores entre 5 e 10 (“moderadamente a altamente poluído”).

Diante do exposto, através dos cálculos do FE, os elementos que possuem maiores níveis de contaminação são o $Mo > As > Cd > Co > Ni > Hg > U > Cu > Zn > Pb$ e microbacias que apresentam altos valores de FE e se concentram na porção sul da área, com íntima relação com as rochas graníticas gnáissicas do embasamento cristalino e rochas vulcanossedimentares (*greenstones belt*), sendo que, em vários casos, há grande probabilidade de influência antropogênica, principalmente quando se trata de amostras próximas às regiões urbanizadas.

Figura 188: Mapas de Fator de Enriquecimento (FE) para os elementos As e Mo, tendo o Al como normalizador.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Em relação aos cálculos do Fator de Contaminação (FC) para a área estudada, foram registradas, ao menos, 1 microbacia com classificação “altamente a extremamente poluídas” ($FC > 6$) para 9 dos 10 EPTs considerados nesse estudo (As, Cd, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, U e Zn). A classificação das microbacias como “altamente poluída” (valores de FC entre 3 e 6) e “moderadamente poluída” (valores de FC entre 1 e 3) foi apresentada para todos os 10 EPTs considerados (**Anexo C**).

Valores significativos de FC (entre 3 e 6) para As, Ni, Co, U, Zn, Cu, Hg e Mo ocorrem preferencialmente na porção sul da área de estudo, o que pode ser explicado pela presença de concentrações significativas destes elementos nos domínios de litotipos do *greenstone belt* Rio das Velhas (RV), onde são encontradas rochas máficas/ultramáficas (no caso do Ni e do Co) e as mineralizações de Au, que possuem fases sulfetadas significativas que contêm os elementos Zn, Cu e Hg. Já os altos valores de FC registrados ao U, eles podem ser explicados pela significativa ocorrência de rochas granitóides e gnáissicas das unidades: CBH, GCD e PST.

As microbacias classificadas como “altamente poluídas” e “extremamente poluídas” para Cd são apresentadas, em sua maioria, também na porção sul da área estudada, o que pode ser corroborado pela presença deste elemento também nas fases sulfetadas das mineralizações auríferas, principalmente em afinidade com o Zn (REIMANN & CARITAT, 1998).

Entretanto, microbacias “altamente poluídas” e “extremamente poluídas” para As, Mo, Pb, Co, Hg e Cd (**Figura 19**), ocorrem nos domínios de litotipos pertencentes à Bacia Neoproterozóica do São Francisco, na porção centro-norte, nordeste e noroeste da área de estudo. Tais evidências podem representar a influência antropogênica nessas microbacias, uma vez que tais elementos não são comuns entre os litotipos neste bloco tectônico.

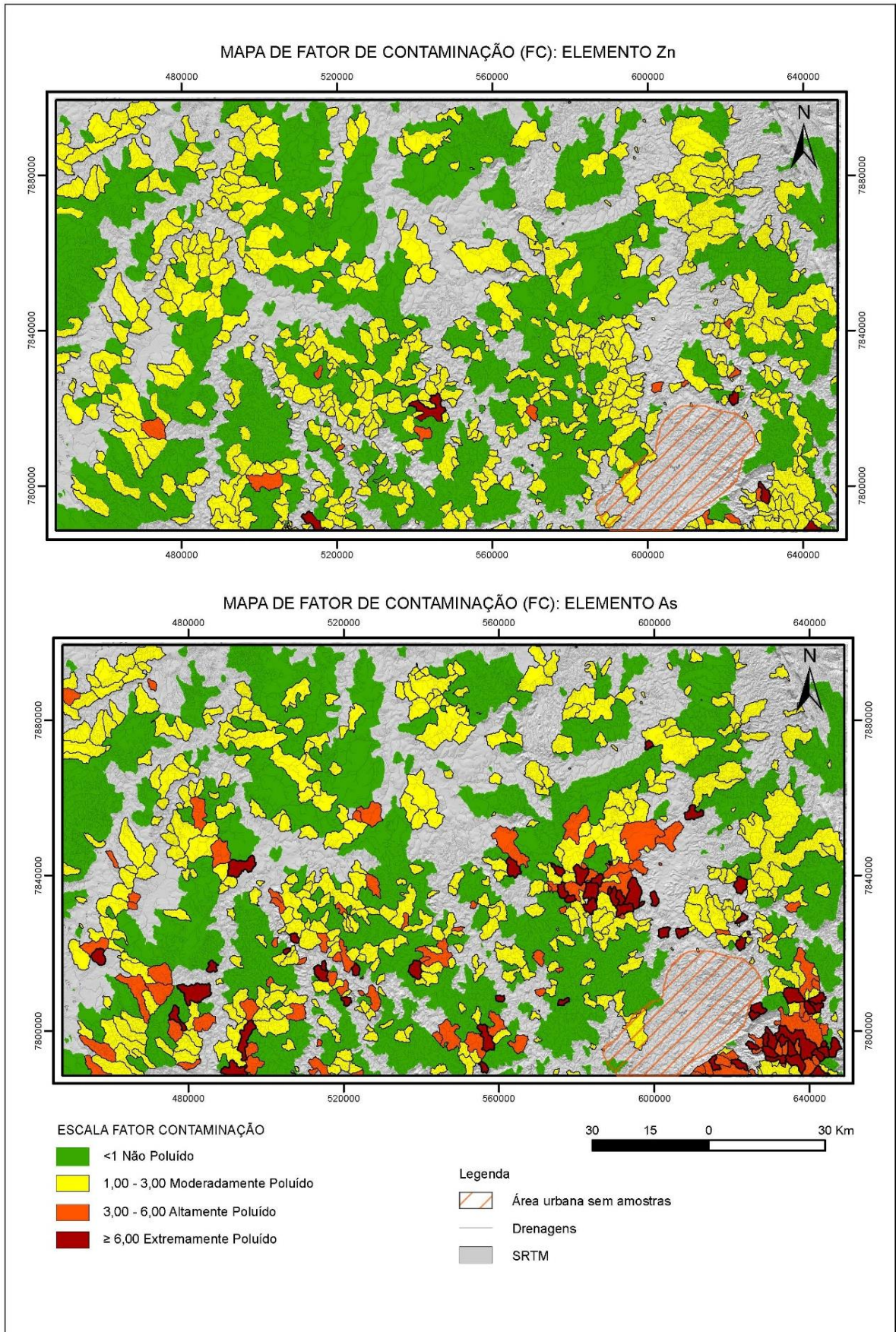
Ao se considerar as principais atividades antropogênicas da área estudada, os valores significativos de FC para determinados elementos, a saber, As, Ni, Co, Mo e Pb, têm destaque. Para As, suas principais fontes antropogênicas são: fundições, escombrelas, combustão de carvão, efluentes de pocilgas e de aviários, fertilizantes fosfatados, herbicidas, inseticidas e fungicidas (ADRIANO, 1986; REIMANN & CARITAT, 1998). Já as principais fontes antropogênicas para Pb são: indústrias do plástico, do vidro, das munições, das ligas especiais, do revestimento de cabos, entre outros. Enquanto que, para Ni, Co e Mo, estes estão relacionados às indústrias de ligas metálicas, especialmente no aço inoxidável, nas baterias e nos catalizadores (REIMANN & CARITAT, 1998).

A maioria das atividades antropogênicas relacionadas anteriormente estão presentes na área de estudo. Portanto, para exemplificar, as **Figuras 20 e 21** mostram determinadas regiões da área de estudo ampliadas, relacionando atividades industriais a microbacias com altos

valores de FC para As e Pb, respectivamente. A localização de indústrias siderúrgicas/metalúrgicas mostra correlações espaciais significativas com microbacias classificadas como “altamente poluída” e “extremamente poluída” para As. Já para Pb, há correlação espacial de microbacias “altamente poluída” e “extremamente poluída” relacionadas com a indústria de plástico.

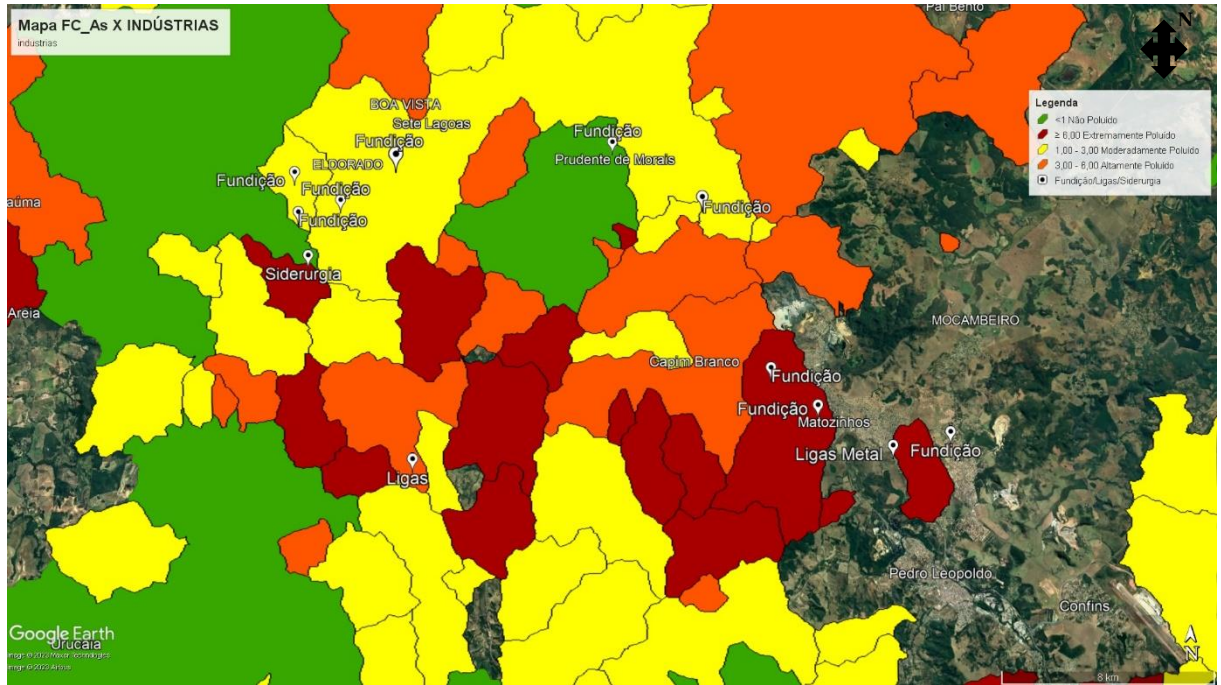
Por fim, o ranqueamento crescente em relação aos valores de FC apresentados para os EPTs considerados foi: Zn < Pb < U < Hg < Ni < Cu < Co < Cd < Mo < As.

Figura 1919: Mapas de Fator de Contaminação (FC) para os elementos As e Zn.



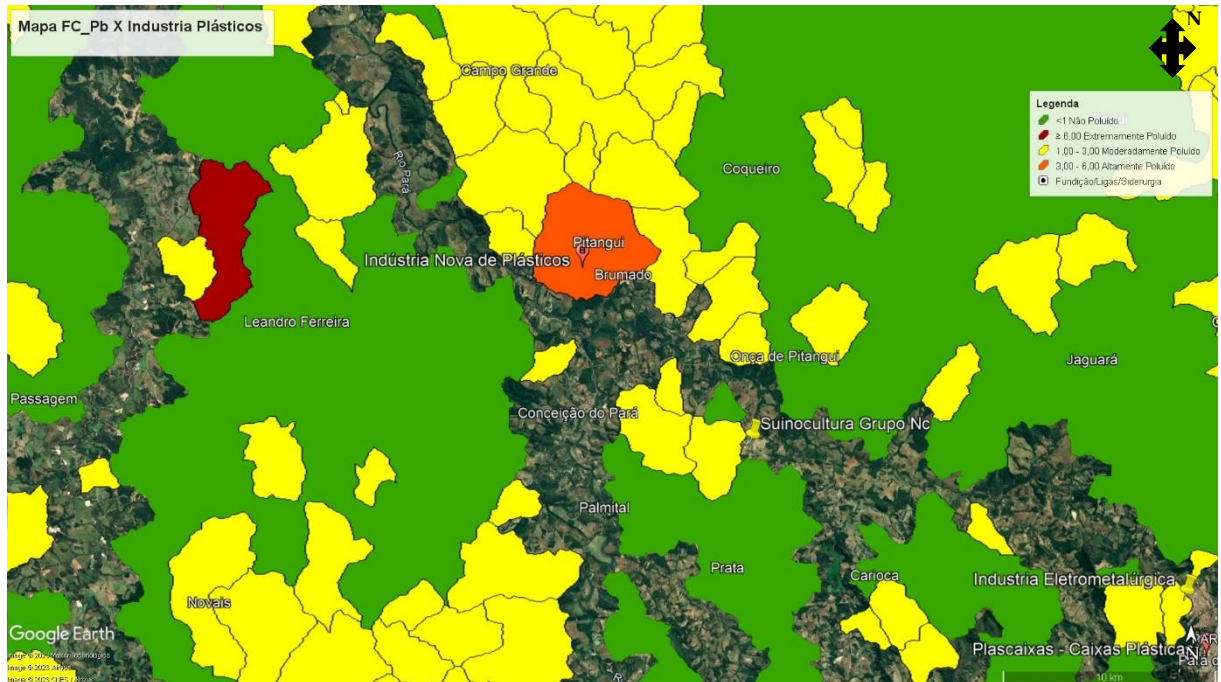
Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

Figura 200: Figura do FC do As, sobreposta às imagens do *Google Earth*.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023. Gerada, a partir do FC do elemento As, sobre imagem do *Google Earth*.

Figura 21: Figura do FC do Pb, sobreposta às imagens do *Google Earth*.



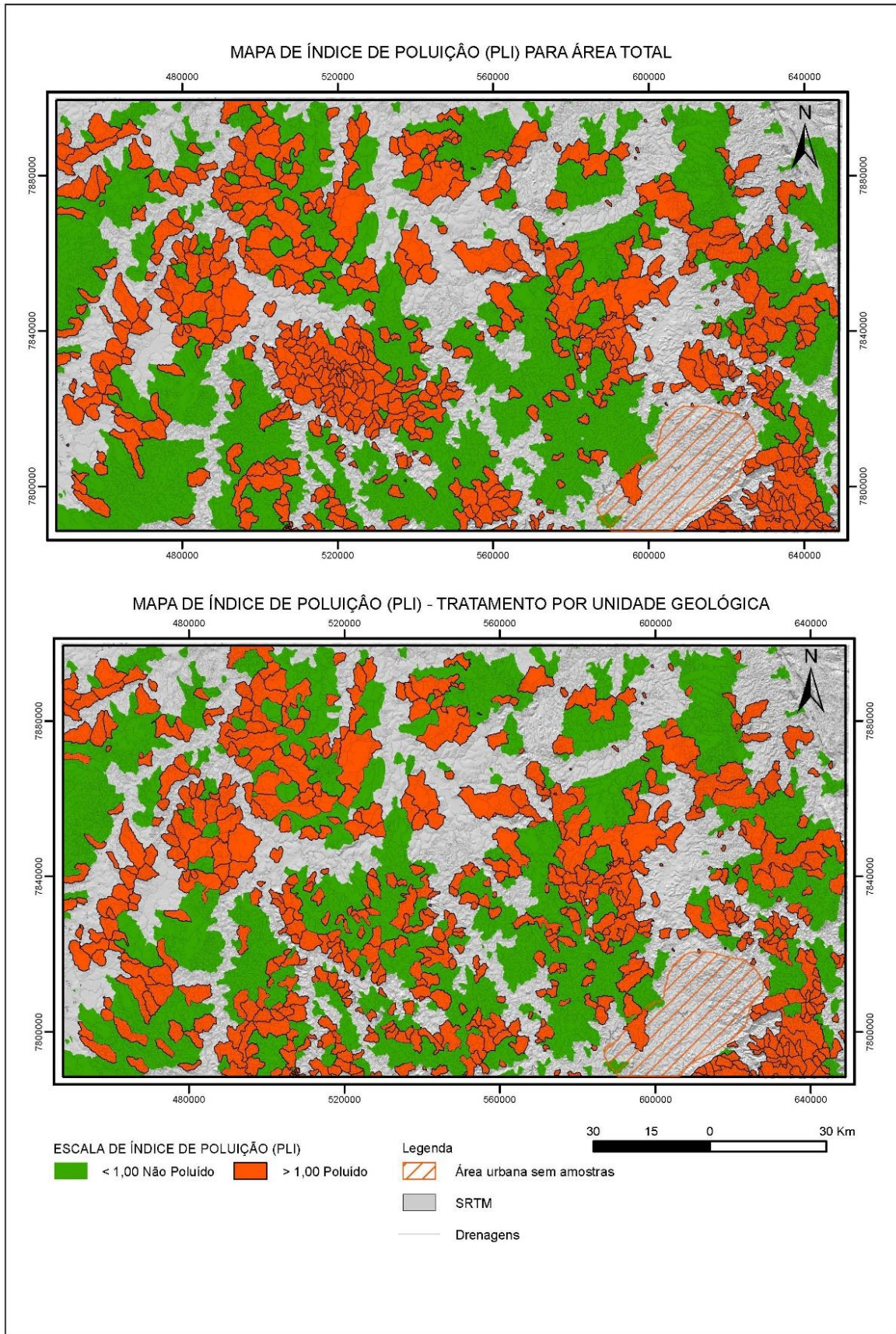
Fonte: Elaborado pela autora, 2023. Gerada, a partir do FC do elemento Pb, sobre imagem do *Google Earth*.

O Índice de Poluição (PLI) representa o número de vezes pelo qual a concentração do metal pesado no sedimento ultrapassou o valor de referência (*background*), e indica o nível geral de metal pesado poluente em uma amostra (SIVAKUMAR *et al.*, 2016).

Observa-se uma pequena diferença nos resultados quando os cálculos são realizados considerando os valores de *background* de um único valor para a área toda, comparados aos cálculos por unidade geológica (**Figura 22**).

Ao se comparar os dois modos de cálculo, ocorre uma maior dispersão e diluição das áreas contaminadas, considerando as unidades geológicas; contudo, observa-se que em ambos ainda há um elevado número de microbacias apresentando classificação “poluída”, independente se há maior influência geogênica ou antropogênica em determinadas porções da área de estudo. Esta constatação mostra que tal índice pode apresentar alguns vieses.

Figura 22: Mapas de Índice de Poluição (PLI) com tratamento global dos dados e por unidade geológica.

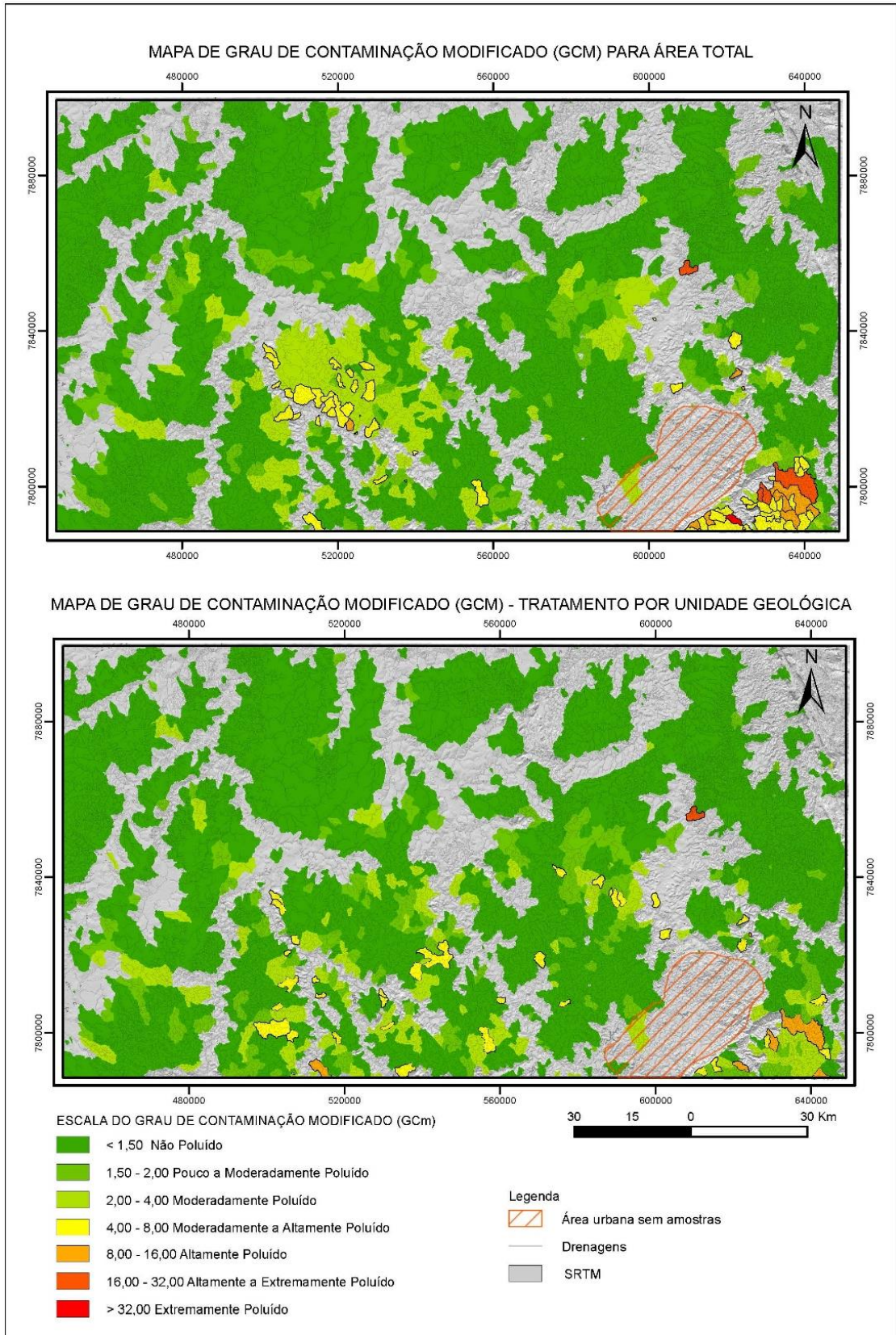


Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

O Grau Modificado de Contaminação (GCm) foi introduzido para estimar o grau geral de contaminação em um determinado local ou área, calculado através do somatório dos fatores de contaminação dos metais considerados, divididos pelo número de metais poluentes apontados (**Figura 23**). Os valores obtidos deste índice, considerando um único valor de *background* (valor mediano do elemento, considerando todas as amostras), mostra, de forma geral, uma maioria de microbacias classificadas como “não poluída” ($< 1,50$). No extremo SE da área, observam-se níveis de contaminação que variam de 4 a 8 (“moderadamente a altamente poluído”) até valores > 32 (“extremamente poluído”); enquanto que na região centro-sul, também são observados valores que variam de 2 a 4 (“moderadamente poluído”) até valores de 4 a 8 (“moderadamente a altamente poluído”).

Após a individualização dos dados por unidades geológicas, é constatado que as porções da área de estudo que apresentaram valores maiores de grau de contaminação passaram a apresentar valores de, no máximo, de 8 a 16 (“altamente poluído”). Isso pode se dever aos valores de referência da região serem naturalmente mais elevados quando comparados ao cálculo que considera um único valor de *background*. Apesar disso, nota-se uma microbacia na região centro-leste da área de estudo com níveis de contaminação de 16 a 32 (“altamente a extremamente poluído”) em ambos os cálculos de GCm, o que sugere uma possível área de contaminação antropogênica.

Figura 23: Mapas de Grau de Contaminação Modificado (GCM) com tratamento global dos dados e por unidade geológica.

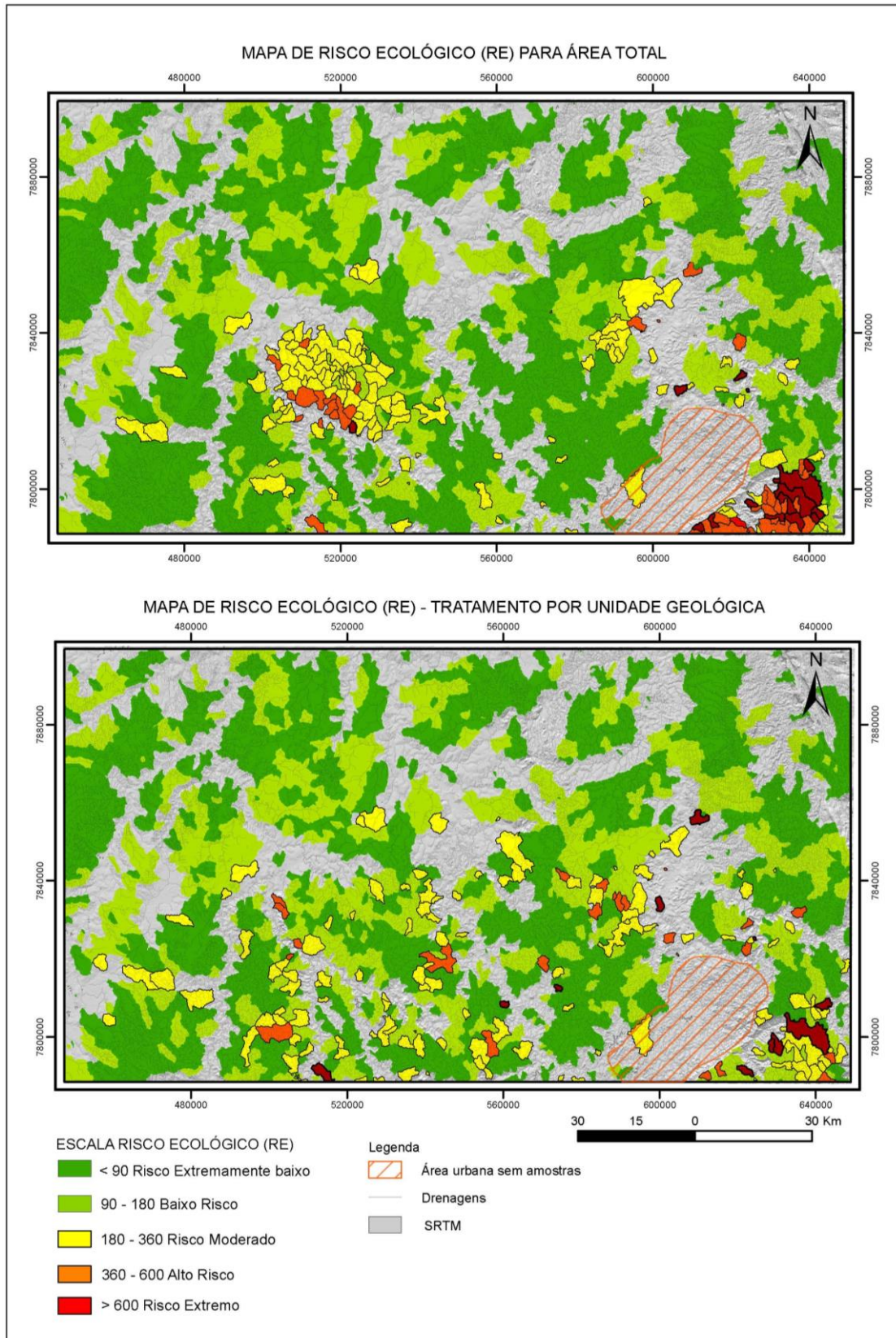


Fonte: Elaborando pela autora, 2023.

O índice de Risco Ecológico potencial (RE), conforme mostra a **Figura 24**, é usado para avaliar as características e o comportamento ambiental de metais pesados contaminantes em sedimentos, indicando agentes contaminantes e locais de atenção prioritárias (HAKANSON, 1980). Para a geração deste mapa, apresentam-se os elementos e os seus respectivos fatores de respostas tóxicas: (As (10), Cd (30), Co (5), Cr (2) Cu (5), Mo (5), Ni (5), Pb (5), U (2), Zn (1)).

Observa-se, aqui, um comportamento similar ao obtido para o GCm, onde o RE, após os cálculos por unidades geológicas, manteve valores > 600 (risco extremo), mas com menor expressividade e de forma diluída (menor concentração local dos altos valores de RE). Este comportamento pode ser relacionado aos valores de referência da região serem naturalmente mais elevados quando se comparados aos valores medianos da área total.

Figura 24: Mapas de grau de Risco Ecológico (RE) com tratamento global dos dados e por unidade.



Fonte: Elaborando pela autora, 2023

4.5 Produto técnico

O produto tecnológico é um produto com elevado grau de novidade, fruto da aplicação de novos conhecimentos científicos, técnicas e expertises desenvolvidas no âmbito da pesquisa. É utilizado, diretamente, na solução de problemas, visando o bem-estar social (CAPES, 2019).

Mapas são produtos originados de estudos cartográficos e se enquadram no tipo de produto: Carta, Mapa ou similar, segundo a Capes (2019). Assim, representam uma superfície plana de forma gráfica, e têm como objetivo trazer ao leitor informações de objetos ou fenômenos de origem física natural e/ou de origem antropogênica. Ademais, são obtidos a partir de um trabalho de levantamento geoquímico e de diversos tratamentos robustos de estatística e de processamento espacial da informação.

Estes produtos técnicos são resultados desta dissertação e têm como objetivo fornecer valores de referência para o controle e à mitigação de elementos químicos potencialmente tóxicos, bem como fornecer informações espaciais de índices ambientais com áreas que merecem devidas atenções em relação à disponibilidade destes elementos.

Concentrações elevadas de elementos potencialmente tóxicos são extremamente nocivas, causando impactos negativos no ecossistema e na saúde humana (RIBEIRO FILHO *et al.*, 2001).

A determinação do *background* geoquímico para determinação de valores naturais de elementos-traço em diferentes amostras — sejam elas em sedimentos de corrente, solo e ou água —, em estudos ambientais, tem se tornado essencial à preservação da vida.

Índices ambientais permitem quantificar o enriquecimento e o empobrecimento desses elementos em diversas matrizes geológicas, principalmente em sedimentos e solos. Para isso, é necessário compará-los com os valores de referência (SIVAKUMAR *et al.*, 2016).

Diante do exposto, serão apresentados os produtos obtidos a partir de tratamentos estatísticos dos dados globais da área e, também, os produtos obtidos a partir de tratamentos estatísticos após a individualização dos dados por unidades geológicas (**Apêndice B e C**).

5. CONCLUSÕES

Após a exposição dos resultados, foi evidenciado que diversas regiões da área de estudo mostram resultados com concentrações dos 21 elementos químicos analisados apresentando concentrações elevadas ou acima dos parâmetros legais definidos pelas legislações vigentes atuais — sejam elas estaduais, federais ou até mesmo valores de referências internacionais utilizados com frequência.

Verifica-se, também, que o estabelecimento de valores de referência (*background*) para elementos-traço tem fundamental importância, não somente na pesquisa mineral, mas em estudos ambientais; pois se faz de grande relevância balizar as decisões de controle e mitigação de áreas contaminadas ou potencialmente contaminadas que possam trazer riscos à saúde e para todo o ecossistema relacionado.

A utilização inadequada, ou o uso de valores de referência sem levar em consideração a variabilidade local, podem induzir a interdição ou a remediação de áreas naturalmente enriquecidas de determinados elementos, levando a perdas de recursos (financeiro e/ou econômico). Por outro lado, podem enquadrar regiões contaminadas como regiões sem riscos potenciais à saúde e à vida. Portanto, os índices ambientais podem ser considerados importantes ferramentas de controle e mitigação de regiões contaminadas.

Dentre os índices que consideram todos os FCs dos EPTs, o Índice de Poluição (PLI) indica uma grande quantidade de microbacias consideradas poluídas em, pelo menos, um poluente; o Grau Modificado de Contaminação (GCm) apresentou contaminações naturais relacionadas à geologia na porção sudeste da área, bem como uma microbacia altamente poluída (que não se verificou a correspondência com os litotipos e também não foi possível comprovar a contaminação antrópica devido a não presença de atividade antropogênica compatível); por fim, o Risco Ecológico (RE), que, assim como os demais métodos utilizados, mostrou valores elevados, principalmente no extremo sudeste da área, o que pode ter íntima relação com os litotipos dominantes desta região (rochas vulcanossedimentares).

Os resultados indicam que a área de estudo possui grande influência da geologia local, devido à grande variedade litológica. Apesar disso, é possível observar áreas com valores anômalos que indicam possível contaminação de origem antropogênica.

REFERÊNCIAS

- ADRIANO, D. C. Other trace elements. **Trace Elements in the Terrestrial Environment**, p. 470-501, 1986.
- ALBANESE, S.; VIVO B. de; LIMA A.; CICCHELLA D. Geochemical *background* and baseline values of toxic elements in stream sediments of Campania region (Italy). **Journal of Geochemical Exploration**, v. 93, n. 1, p. 21-34, 2007.
- ALKMIM F. F. & MARSHAK., S. Transamazonian Orogeny in the Southern São Francisco Craton Region, Minas Gerais, Brazil: evidence for Paleoproterozoic collision and collapse in the Quadrilátero Ferrífero. **Precambrian Research**, 90, p. 29–58, 1998
- ALKMIM, F. F.; BRITO NEVES, B. B.; CASTRO ALVES, J. A. Arcabouço estrutural do Cráton do São Francisco. **O Cráton do São Francisco. Sociedade Brasileira de Geologia, Salvador, Brazil**, p. 45-62, 1993.
- ALKMIM, F. F. de. O que faz de um cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, p. 17-34, 2004.
- ALMEIDA ABREU, P.A. **O Supergrupo Espinhaço da Serra do Espinhaço Meridional, Minas Gerais: o rifte, a bacia e o orógeno**. Geonomos, Belo Horizonte, v.3(1), p.1-18, 1995.
- ALMEIDA F. F. M. de. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7: 349-364, 1977.
- AYARI, J. *et al.* Trace element contamination in the mine-affected stream sediments of Oued Rarai in north-western Tunisia: a river basin scale assessment. **Environmental Geochemistry and Health**, p. 1-16, 2021.
- BAI J. *et al.* Mapping geochemical singularity using multifractal analysis: Application to anomaly definition on stream sediments data from Funin Sheet, Yunnan, China. **Journal of Geochemical Exploration**, 2009.
- BAIZE, D.; STERCKEMAN, T. Of the necessity of knowledge of the natural pedogeochemical *background* content in the evaluation of the contamination of soils by trace elements. **Science of the Total Environment**, v. 264, p. 127-139, 2001.
- BARBOSA G. V. & RODRIGUES D. M. S. Quadrilátero Ferrífero. Belo Horizonte: UFMG. 123 p, 1967.
- BETTENCOURT, P. *et al.* **Plano de recursos hídricos da bacia hidrográfica do rio São Francisco**. Recursos Hídricos, v. 37, n. 1, 2016.
- BORBA, R. P. *et al.* Arsenic in water and sediment in the iron quadrangle, state of Minas Gerais, Brazil. **Revista Brasileira de Geociências**, v. 30, n. 3, p. 554-557, 2000.
- BRUNO, A.P.S. **Concentração de metais pesados e elementos-traço em dois trechos da planície de inundação do baixo curso rio Jaboatão**, Pernambuco, Brasil. 2005. Programa de Pós-Graduação em Geociências do Centro de Tecnologia e Geociências (Dissertação de Mestrado), Universidade Federal de Pernambuco, Pernambuco, 2005. 66p.

CAMPOS F.F & LICHT O. A. B. Correlation Diagrams: graphical visualization of geochemical associations using the EzCorrGraph app, *Journal of Geochemical Exploration*, 2020. Disponível em: <https://ezcorrgraph.firebaseio.com/>. Acesso em: 08 set. 2022.

CAMPOS F.F & LICHT O. A. B. Correlation diagrams: Graphical visualization of geochemical associations using the EzCorrGraph app. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 220, p. 106657, 2021.

CARITAT P. & COOPER M. A continental-scale geochemical atlas for resource exploration and environmental management: The National Geochemical Survey of Australia, 2016.

CARITAT P. *et al.* Regional distribution of Al, B, Ba, Ca, K, La, Mg, Mn, Na, P, Rb, Si, Sr, Th, U and Y in terrestrial moss within a 188,000 km² area of the central Barents region: influence of geology, seaspray and human activity. **Applied Geochemistry**, v. 16, n. 2, p. 137-159, 2001.

CARNEIRO, P. A. S. *et al.* Transformações sócio-regionais decorrentes da consolidação e modernização da cultura do café no cerrado mineiro. **Geografia**, v. 30, n. 3, p. 491-505, 2005.

CARRANZA E. J. M. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. *Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry*, Vol. 11, M. Hale (Series Editor), 2009.

CARRANZA E. J. M. Geochemical sampling for geological–environmental studies. **Journal of geochemical exploration**, v. 111, n. 3, p. 57-58, 2011.

CARRANZA E.J. M. **Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS**. Elsevier, 2008.

CARRANZA, E. J. M. Mapping of anomalies in continuous and discrete fields of stream sediment geochemical landscapes, 2010.

CARVALHO, I.G. **Fundamentos da geoquímica dos processos exógenos**. Salvador: Bureau, 1995.

CASTRO, C.; PEREIRA, C. N. Revitalização da bacia hidrográfica do rio São Francisco: histórico, diagnóstico e desafios, 2019. Disponível em: <https://repositorio.ipea.gov.br/handle/11058/9351>. Acesso em 07 dez. 2022.

CCME-CANADIAN COUNCIL OF MINISTERS OF THE ENVIRONMENT. Canadian sediment quality guidelines for the protection of aquatic life. **Canadian Environmental Quality Guidelines**, CCME, 2002.

CHENG Q. The perimeter–area fractal model and its application in geology. *Math. Geol.* 27, p. 69–82, 1995.

CHENG Q. Spatial and scaling modelling for geochemical anomaly separation. *J. Geochem. Explor.* 65, 175–194, 1999.

CHENG Q. MULTIFRACTAL theory and geochemical element distribution pattern. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* 25 (3), p.311–318, 2000.

CONAMA, Resolução. Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, Resolução N°344, 25 de março de 2004. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2004 (Revogada). Disponível em: <https://www.diariodasleis.com.br/busca/exibelink.php?numlink=1-40-34-2004-03-25-344>. Acesso em 05 jun. 2022.

CONAMA, Resolução. Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, Resolução N°396, 03 de abril de 2008. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2008. Disponível em: <http://portalpnqa.ana.gov.br/Publicacao/RESOLU%C3%87%C3%83O%20CONAMA%20n%C2%BA%20396.pdf>. Acesso em 05 jun. 2022.

CONAMA, Resolução. Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, Resolução N°420, 28 de dezembro de 2009. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2009. Disponível em: <https://cetesb.sp.gov.br/areas-contaminadas/wp-content/uploads/sites/17/2017/09/resolucao-conama-420-2009-gerenciamento-de-ac.s.pdf>. Acesso em 05 jun. 2022.

CONAMA, Resolução. Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, Resolução N°430, 16 de maio de 2011. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2011. Disponível em: <https://www.legisweb.com.br/legislacao/?id=114770>. Acesso em 05 jun. 2022.

CONAMA, Resolução. Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, Resolução N°454, 01 de novembro de 2012. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2012. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=667. Acesso em 05 jun. 2022.

COPAM, Deliberação Normativa. Conselho Estadual De Política Ambiental – COPAM/CERH n° 02, de 08 de setembro de 2010. D. E. – “Minas Gerais”, Belo Horizonte, 2010.

COPAM, Resolução. Conselho Estadual De Política Ambiental – COPAM, Resolução N° 166, de 29 de junho de 2011. Diário do Executivo de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. 05 jun. 2022.

CORDANI U.G. *et al.* Interpretação tectônica e petrológica de dados geocronológicos do embasamento no bordo sudeste do Quadrilátero Ferrífero, MG. Rio de Janeiro: Anais da Academia Brasileira de Ciências, v.52, n.4, p.785-799, 1980.

COSTA, A.T. Registro histórico de contaminação por metais pesados, associadas à exploração aurífera no alto e médio curso da bacia do Ribeirão do Carmo, QF: um estudo de sedimentos de planícies de inundação e terraços aluviais. 2007. Tese (doutorado em geologia) - Programa de Pós-Graduação em Evolução Crustal e Recursos Naturais, Departamento de Geologia, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2007.

COSTA, M. T.; BRANCO, J. J. R. Roteiro para a excursão Belo Horizonte - Brasília. XIV Congresso Brasileiro de Geologia, publicação n° 15, 9-25. Belo Horizonte: SBG, 1961.

COUTO, J. G. *et al.* Considerações sobre a idade do Grupo Bambuí com base em análises isotópicas de Sr e Pb. Revista Brasileira de Geociências, v. 11, n. 1, p. 5-16, 1981.

CROMMENTUIJN, T. *et al.* Maximum permissible and negligible concentrations for metals and metalloids in the Netherlands, taking into account *background* concentrations. Journal Environmental Management, v. 60, p. 121-143, 2000.

- DALL'AGNOL, R. *et al.* Mineralogy, geochemistry, and petrology of Neoproterozoic ferroan to magnesian granites of Carajás Province, Amazonian Craton: The origin of hydrated granites associated with charnockites. *Lithos*, v. 277, p. 3-32, 2017.
- DARDENNE, M.A. Os grupos Bambuí e Paranoá na faixa dobrada Brasília. In: SIMPÓSIO CRÁTON SÃO FRANCISCO, 1, 1979, Salvador. Anais... Salvador: Sociedade Brasileira de Geologia/Núcleo Bahia, Coordenação da Produção Mineral, p.140-157, 1981.
- DARDENNE, M.A. Síntese sobre a estratigrafia do Grupo Bambuí no Brasil Central. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 30, 1978, Recife. Anais... Recife: Sociedade Brasileira de Geologia, v.2, p.597-610, 1978.
- DARNLEY, A. G. *et al.* A global geochemical database for environmental and resource management: recommendations for International Geochemical Mapping, final report of IGCP Project 259, 1995.
- DAVIS, P. A.; KOZAK, R. C.; SCHABER, G. G. (1986). Global radar units on Venus derived from statistical analysis of Pioneer Venus Orbiter radar data. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 91, n. B5, p. 4979-4992, 1986.
- DELGADO, I. *et al.* Mapa tectônico do Brasil. Escala 1:5.000.000 CPRM, 2003 (cd)
- DOLEŽALOVÁ WEISSMANNOVÁ, H. *et al.* Potential ecological risk and human health risk assessment of heavy metal pollution in industrial affected soils by coal mining and metallurgy in Ostrava, Czech Republic. *International journal of environmental research and public health*, v. 16, n. 22, p. 4495, 2019.
- DORR J. N. Physiographic, stratigraphic, and structural development of the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais". U.S. Geol. Survey. Professional. Paper, 1969.
- DUARTE, A. J. Recursos minerais do Estado de Minas Gerais. **Metamig**. Belo Horizonte-MG, 1982.
- FADIGAS, F. de S. *et al.* Proposição de valores de referência para a concentração natural de metais pesados em solos brasileiros. **Revista Brasileira de Engenharia Agrícola e Ambiental**, v. 10, p. 699-705, 2006.
- FEAM, Fundação Estadual do Meio Ambiente. Inventário de áreas contaminadas Estado de Minas Gerais: 2021 / Fundação Estadual do Meio Ambiente. — Belo Horizonte: Feam. 34p, 2021.
- FERRAZ, G. A. S. *et al.* Spatial variability of soil fertility attributes and productivity in a coffee crop farm, 2019.
- FERRI, M. G. Vegetação Brasileira. Editora da Universidade de São Paulo: São Paulo. 157p, 1980.
- FILZMOSER, P.; HRON, K.; REIMANN, C. Principal component analysis for compositional data with *outliers*. **Environmetrics: The Official Journal of the International Environmetrics Society**, v. 20, n. 6, p. 621-632, 2009.
- FJP, Indicadores Econômicos, 23. Fundação João Pinheiro - FJP. Diretoria de Estatística e Informações. Produto interno bruto dos municípios de Minas Gerais: ano de referência 2017. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://fjp.mg.gov.br/wp->

[content/uploads/2020/02/Estatistica-Infoacoes-23-PIB-dos-municipios.pdf](#). Acesso em: 23 fev. 2023.

FJP, Indicadores Econômicos, 45. Fundação João Pinheiro - FJP. Diretoria de Estatística e Informações Produto Interno Bruto dos municípios de Minas Gerais: ano de referência 2019. Belo Horizonte, 2022. Disponível em: https://fjp.mg.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/13.01_Serie-Estatistica-Infoacoes-Produto-Interno-Bruto-dos-Municipios-2019_com-capa.pdf. Acesso em: 23 fev. 2023.

FRIZZO, S.J., LICHT, O.A.B. Estatística uni e bivariadas aplicadas à prospecção geoquímica. In: LICHT, O.A.B., DE MELLO, C.S.B., DA-SILVA, C.R. (eds). **Prospecção geoquímica de depósitos minerais metálicos, não-metálicos, óleo e gás**. Rio de Janeiro: Sociedade Brasileira de Geoquímica (SBGq) e Serviço Geológico do Brasil (CPRM), 2007.

GAIR J. E. The Sabará Formation. In: Symposium on Stratigraphy of Minas Series in the Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brazil. Bol. SBG, 7(2):68-69, 1958.

GALUSZKA A. A review of geochemical *background* concepts and an example using data from Poland. **Environmental geology**, v. 52, n. 5, p. 861-870, 2007a.

GAŁUSZKA, A. Different Approaches in Using and Understanding the Term "Geochemical Background"--Practical Implications for Environmental Studies. **Polish journal of environmental studies**, v. 16, n. 3, 2007b.

GAŁUSZKA, A.; MIGASZEWSKI, Z. M. Geochemical *background*-an environmental perspective. **Mineralogia**, v. 42, 2012.

GANDINI A. L. Mineralogia, inclusões fluídas e aspectos genéticos do Topázio Imperial da região de Ouro Preto, Minas Gerais. 212 p. Dissertação de Mestrado – USP, São Paulo, 1994.

GASPARON, M. *et al.* The freshwater lakes of the Larsemann Hills, East Antarctica: chemical characteristics of the water column, 2002.

GEORGOPOULOS, G. *et al.* Environmental availability of ultramafic rock derived trace elements in the fumarolic-geothermal field of Soussaki area, Greece. **Applied Geochemistry**, v. 92, p. 9-18, 2018.

GOLDSCHMIDT, V. M. Geochemistry. Clarendon Press; Oxford, 1954.

GOUGH, L.P. Understanding our fragile environment. Lessons from geochemical studies. United States Geological Survey Circular, v. 1105, p. 1-34, 1993.

GRUNSKY, E. C. The interpretation of geochemical survey data. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, v. 10, n. 1, p. 27-74, 2010.

HAKANSON, L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. **Water research**, v. 14, n. 8, p. 975-1001, 1980.

HAWKES H. E. & WEBB J. S. Geochemistry in mineral exploration. New York, 1962.

HORCKMANS, L., SWENNEN, R., DECKERS, J., MAQUIL, R. Local *background* concentrations of trace elements in soils: a case study in the Grand Duchy of Luxemburg. **Catena**, v. 59, p. 279-304, 2005.

HOROWITZ, A. J. **A primer on trace metal-sediment chemistry**. Washington, DC: US Government Printing Office, 1985.

IBGE, Mapa. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. Mapa de Cobertura e Uso da Terra do Brasil de 2010, 2010. Disponível em:

<https://www.ibge.gov.br/geociencias/downloads-geociencias.html>. Acesso em: 04 jul. 2022.

IBGE, Relatório. Instituto Brasileiro de Geografia e Estatística-IBGE. Monitoramento da Cobertura e Uso da Terra do Brasil, 2021. Disponível em:

https://www.ibge.gov.br/apps/monitoramento_cobertura_uso_terra/v1/#/home/. Acesso em: 04 jul. 2022.

INMET, Instituto Nacional De Meteorologia. Dados Clima: Precipitação Acumulada no período de 1991-2020. Disponível em: <https://clima.inmet.gov.br/>. Acesso em: 03 mar. 2023.

INMET, Instituto Nacional De Meteorologia. Diagnóstico Climático de Minas Gerais: Início do período chuvoso 2018/2019, 5º Distrito de Meteorologia / Minas Gerais / Belo Horizonte: Seção de Análise e Previsão do Tempo – SEPRES, 2019. Disponível em:

<https://portal.inmet.gov.br/notasTecnicas#>. Acesso em: 03 mar. 2023.

INMET, Instituto Nacional De Meteorologia. Minas Gerais: Balanço Climatológico de Janeiro de 2022 Análise das Condições Observadas em Minas Gerais de Janeiro de 2022 e Prognóstico Climático. Disponível em:

https://portal.inmet.gov.br/uploads/notastecnicas/NT_Janeiro-MG_2022-02-08-200444_hexa.pdf. Acesso em: 03 mar. 2023.

JESUS, H.C. *et al.* Distribuição de metais pesados em sedimentos do sistema estuarino da ilha de Vitória do Espírito Santo, ES. Química Nova, v. 27, n. 3, p. 378-386, 2004.

JONSSON, J., SJ € OBERG, S., L € OVGREN, L. Adsorption of Cu(II) to schwertmannite and € goethite in presence of dissolved OM. Water Res. 40, 969e974, 2006.

KABATA-PENDIAS A. & PENDIAS H. Trace Elements in Soils and Plants. Boca Raton, CRC Press, 403 p. DOI: 10.1201/b10158-25, 2001.

KAMANI, Hossein *et al.* Heavy metal contamination in street dusts with various land uses in Zahedan, Iran. Bulletin of environmental contamination and toxicology, v. 94, p. 382-386, 2015.

KNAUER, L.G. Evolução geológica do Precambriano da porção centro leste da Serra do Espinhaço Meridional e metalogênese associada. 1990. 298p. Dissertação (Mestrado), UNICAMP, Campinas, 1990.

KNAUER, L.G. O Supergrupo Espinhaço em Minas Gerais: considerações sobre sua estratigrafia e seu arranjo estrutural. Geonomos, Belo Horizonte, v.15, p.81-90, 2007

KRAUSKOPF, K. B. **Introduction to geochemistry**, 3 ed., Boston: WCB McGraw-Hill, 1995.

KUCHENBECKER, M. *et al.* Proveniência e análise sedimentar da porção basal do Grupo Bambuí em Arcos (MG). **Geologia USP. Série Científica**, v. 13, n. 4, p. 49-61, 2013.

LADEIRA E. A., ROESER H. M. P., TOBSCHALL H. J. 1983. Evolução Petrogenética do Cinturão de Rochas Verdes, Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais. In: Simpósio Geológico. De Minas Gerais, 2. Belo Horizonte. P. 149-165.

- LAPWORTH, D. J. *et al.* Geochemical mapping using stream sediments in west-central Nigeria: implications for environmental studies and mineral exploration in West Africa. **Applied Geochemistry**, v. 27, n. 6, p. 1035-1052, 2012.
- LARIZZATTI, J. H.; MARQUES, E. D.; SILVEIRA, F. V. Geochemical Mapping of Iron Quadrangle region by active stream sediments, State of Minas Gerais, Brazil. **Geochimica Brasiliensis**, v. 32, n. 2, p. 263-263, 2018.
- LARIZZATTI, J. H.; MARQUES, E. D.; SILVEIRA, F. V. Mapeamento Geoquímico do Quadrilátero Ferrífero e seu entorno-MG. Informes de Recursos Minerais-Série Metais-Informes Gerais, 2014.
- LATRILLE, C. *et. al.* Physical speciation of trace metals in FeMn concretions from a rendzic lithosol developed on Sinemurian limestones (France). **Geoderma**, 127e146, 2001.
- LEÃO, M. S. **Diagnóstico climático e estudo das variações termo-higrométricas do município de Sete Lagoas - MG.** 2008. 150 p. Dissertação (Mestrado em Geografia), Programa de Pós-Graduação em Geografia, Universidade Federal de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2008.
- LEDIEU, L. *et al.* Geochemical insights into spatial and temporal evolution of sediment at catchment scale (Egoutier stream, France). **Applied Geochemistry**, v. 122, p. 104743, 2020.
- LI, C.H., MA, T., JUNFA, S. Application of a fractal method relating concentrations and distances for separation of geochemical anomalies from *background*. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 77, p. 167-175, 2003.
- LICHT O. A. B. **A geoquímica multielementar na gestão ambiental. Identificação e caracterização de províncias geoquímicas naturais, alterações antrópicas da paisagem, áreas favoráveis à prospecção mineral e regiões de risco para a saúde no estado do Paraná, Brasil.** Tese, Setor de Ciências da Terra, Universidade Federal do Paraná, 2001.
- LICHT, Otavio Augusto Boni. Multiscale, multimedia and multi-element geochemical mapping of the State of Paraná, Brazil. **Geochimica Brasiliensis**, v. 32, n. 2, p. 209-242, 2018.
- LIN, J., CHEN, S. The relationship between adsorption of heavy metal and OM in river sediments. **Environ. Int.**, 345e352, 1998.
- MACHADO, M. F.; SILVA, S. F. Geodiversidade do estado de Minas Gerais. Programa Geologia do Brasil – Levantamento da Geodiversidade. Serviço Geológico do Brasil – CPRM, 2010.
- MAFTEI, A. E., DILL, H. G., BUZATU, A., IANCU, O. G., BUZGAR, N., & ANDRÁŠ, P. Chemical and mineralogical composition of fluvial sediments (Bistrita River, Romania): Geogenic vs. anthropogenic input into rivers on its way through mining areas. **Geochemistry**, v. 78, n. 3, p. 385-395, 2018.
- MANLY, B. FJ; MCALEVEY, L.; STEVENS, D. A randomization procedure for comparing group means on multiple measurements. **British Journal of Mathematical and Statistical Psychology**, v. 39, n. 2, p. 183-189, 1986.
- MARCUSSI, M. C. R. Petrogênese e condições de fugacidade de oxigênio da Suíte Alto Maranhão, Cinturão Mineiro: uma análise fundamentada na assembleia de minerais opacos.

2022. 55 f. Monografia (Graduação em Engenharia Geológica) - Escola de Minas, Universidade Federal de Ouro Preto, Ouro Preto, 2022.

MARINHO, M. S. *et al.* **Metalogenia das províncias minerais do Brasil: distrito zincífero de Vazante, MG**, CPRM, 2015.

MARQUES, E.D. Geoquímica, p. 95-106, 2010 disponível em: TULLER, MANOEL PEDRO, *et al.* **Projeto Sete Lagoas-Abaeté**, CPRM, 2010.

MARSHAK, S.; ALKMIM, F. F. Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil. **Tectonics**, v. 8, n. 3, p. 555-571, 1989.

MARTINS-NETO, M. A.; ALKMIM, F. F. Estratigrafia e evolução tectônica das bacias neoproterozóicas do paleocontinente São Francisco e suas margens: Registro da quebra de Rodínia e colagem de Gondwana. **Bacia do São Francisco: Geologia e Recursos Naturais, SBG/Núcleo MG**, p. 31-54, 2001.

MARTINS-NETO, M. A. Sequence stratigraphic framework of Proterozoic successions in eastern Brazil. **Marine and Petroleum Geology**, v. 26, n. 2, p. 163-176, 2009.

MATSCHULLAT, J., OTTENSTEIN, R., REIMANN, C. Geochemical *background* - can we calculate it?. **Environmental Geology**, v. 39, p. 990-1000, 2000a.

MIRLEAN, N.; ROISENBERG, A.; CHIES, J. O. Metal contamination of vineyard soils in wet subtropics (southern Brazil). **Environmental pollution**, v. 149, n. 1, p. 10-17, 2007.

MORAES, L.J. & GUIMARÃES, D. Geologia da região diamantífera do norte de Minas Gerais. Anais da Academia Brasileira de Ciências, Rio de Janeiro, v.2, p. 153-186, 1930.

MOREIRA R. C. A. 2002. Referência Geoquímica regional para interpretação das concentrações dos elementos químicos em sedimentos na bacia do Lago Paranoá – DF. Dissertação de Mestrado em Geociências – Instituto de geociências/UnB.

NAWROT, N. *et al.* Spatial and vertical distribution analysis of heavy metals in urban retention tanks sediments: a case study of Strzyza Stream. **Environmental geochemistry and health**, v. 42, n. 5, p. 1469-1485, 2020.

NAZARPOUR, A. *et al.* Application of classical statistics, logratio transformation and multifractal approaches to delineate geochemical anomalies in the Zarshuran gold district, NW Iran. **Geochemistry**, v. 75, n. 1, p. 117-132, 2015.

NIETO, P.; CUSTODIO, E.; MANZANO, M. Baseline groundwater quality: a European approach. **Environmental Science and Policy**, v. 8, p. 399-409, 2005.

NIMER, E. Climatologia do Brasil. Rio de Janeiro: IBGE, 1979. 422p.

NUNES, L. H.; VICENTE, A. K.; CANDIDO, D. H. Clima da região sudeste do Brasil. In: CAVALCANTI, I. F. A.; FERREIRA, N. J.; JUSTI DA, M. G. A.; SILVA DIAS, M. A. F. Tempo e clima do Brasil. São Paulo: Oficina de textos, 2009. Cap. 16, p. 243-256.

OLIVEIRA, A. H. de. Evolução tectônica de um fragmento do Cráton São Francisco Meridional com base em aspectos estruturais, geoquímicos (rocha total) e geocronológicos (Rb-Sr, Sm-Nd, Ar-Ar, U-Pb). 2004.

- OLIVEIRA, M.R.C. & MARTINS, J. Caracterização e classificação do resíduo “pó do balão”, gerado na indústria siderúrgica não integrada a carvão vegetal: estudo de um caso na região de Sete Lagoas/MG. **Química Nova**, São Paulo, v.26, p.5-9, 2003.
- OTTESEN R. *et al.* Overbank sediment: a representative sample medium for regional geochemical mapping. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 32, n. 1-3, p. 257-277, 1989.
- PALUMBO-ROE, B. *et al.* Stream sediment *background* concentrations in mineralised catchments in Northern Ireland: assessment of ‘pressures’ on water bodies in fulfilment of Water Framework Directive objectives, 2016.
- PARRA R. R. *et al.* Influência Antrópica na Geoquímica de Água e Sedimentos do Rio Conceição, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais – Brasil. , *Geochimica Brasiliensis*, 21(1)036 – 049, 2007.
- PEDROSA-SOARES, A. C. *et al.* Toward a new tectonic model for the late proterozoic Araçuaí (SE Brazil)-West Congolian (SW Africa) belt. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 6, n. 1-2, p. 33-47, 1992.
- PFLUG, R. A geologia da parte meridional da Serra do Espinhaço e zonas adjacentes, Minas Gerais. **Boletim DNPM/DGM**, n.226, Rio de Janeiro, 1965. 55p
- PFLUG, R. Observações sobre a estratigrafia da Série Minas na região de Diamantina, Minas Gerais. DNPM/ DGM, Not. Prel. Est. 142:1-20, Rio de Janeiro, 1968
- PFLUG, R.; RENGGER F. Estratigrafia e evolução geológica da margem sudeste do Cráton Sanfranciscano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, 1973, Aracaju. Anais... Aracaju: Sociedade Brasileira de Geologia, 1973 . v.2, p.5-19.
- PFLUG, R.; HOPPE, A.; BRICHTA, A. Paleogeografia do Pré Cambriano na Serra do Espinhaço, Minas Gerais, Brasil. III Geow. Lat. Koll., Anais, p.33- 40, Boppard, 1980.
- PINHO, J. M. M. *et al.* Geologia e recursos minerais das folhas: Cabeceira Grande, Unaí, Ribeirão Arrojado, Serra da Aldeia, Serra da Tiririca, Paracatu, Guarda-Mor, Arrenegado, Coromandel, Lagamar, Monte Carmelo e Patos de Minas. Projeto Vazante-Paracatu, 2017.
- PINHO, J.M.M.; RIBEIRO, J.H.; TULLER, M.P.; FÉBOLI, W.L.; SIGNORELLI, N. Arcabouço estrutural do Grupo Bambuí na região sudeste do Cráton do São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 43, 2006, Aracajú, Anais... Aracajú: Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, p.111, 2006.
- PINHO, J.M.M. *et al.* Definição semiquantitativa dos domínios estruturais do Grupo Bambuí, na região centro-sul de MG In: CONGRESSO CPRM - Programa Geologia do Brasil 150 BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44, 2008, Curitiba, Anais... Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, CD, 2008.
- PLANT J. *et al.* Environmental geochemistry at the global scale. Geological Society of London, 157: 837–849. DOI: 10.1144/jgs.157.4.837, 2000.
- PLUMLEE, G.S. The environmental geology of mineral deposits. In: PLUMLEE, G.S., LOGSDON, J.J. (eds.). The environmental geochemistry of mineral deposits. Part A, Processes, Techniques, and Health Issues. Society of Economic Geologists Reviews in Economic Geology, v. 6A, p. 71-116, 1999.
- POLETO C. & MERTEN G. H. Elementos traço em sedimentos urbanos e sua avaliação por guidelines. **Holos Environment**, v. 8, n. 2, p. 100-118, 2008.

- REIMANN C. & CARITAT P. Establishing geochemical *background* variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil. **Science of the Total Environment**, v. 578, p. 633-648, 2017.
- REIMANN C. & GARRETT R.G. Geochemical *background*—concept and reality. **Science of the total environment**, v. 350, n. 1-3, p. 12-27, 2005.
- REIMANN C. *et al.* Chemistry of Europe's agricultural soils, Part A: Methodology and interpretation of the GEMAS data set, **Geologisches Jahrbuch Reihe B**, Band B, v. 102, 2014a.
- REIMANN C. *et al.* Chemistry of Europe's agricultural soils, Part B: General *background* information and further analysis of the GEMAS data set. **Geologisches Jahrbuch Reihe B**, v. 103, p. 352, 2014b.
- REIMANN C. *et al.* GEMAS: Establishing geochemical *background* and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil. **Applied Geochemistry**, v. 88, p.302–318, 2018.
- REIMANN C. *et al.* **Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R**. John Wiley & Sons, 2008.
- REIMANN C.; FILZMOSE P.; GARRETT R.G. *Background* and threshold: Critical comparison of methods of determination. **Science of the Total Environment**, v. 346, p. 1–16, 2005.
- REIMANN C.; FILZMOSE P.; GARRETT R.G. Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. **Applied Geochemistry**, v.17, p. 185–206, 2002.
- REIMANN, C. & CARITAT, P. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: Regional geochemical surveys versus enrichment factors. **Science of the Total Environment**, v.337, p. 91–107, 2005
- RENGER F. E. *et al.* Evolução sedimentar do Supergrupo Minas: 500 Ma de registro geológico no Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. *Geonomos*, 2(1):1-11, 1994.
- RIBEIRO J.H.; TULLER, M.P.; DANDERFER FILHO, A. Mapeamento geológico da região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais (escala 1:50.000) – Texto Explicativo. In: Projeto Vida. Belo Horizonte: CPRM, 1991. (versão CD-ROM, 2003)
- RIBEIRO-FILHO, M.R. *et al.* Fracionamento e biodisponibilidade de metais pesados em solo contaminado, incubado com materiais orgânicos e inorgânicos. **Revista Brasileira de Ciências do Solo**, v. 25, p.495-507, 2001.
- RIZZINI, C.T. Tratado de fitogeografia do Brasil: aspectos ecológicos, sociológicos e florísticos. 2 ed. Âmbito Cultural Edições, Rio de Janeiro, 1997.
- ROBAINA L. E. S., FORMOSO M. L. L., PIRES C. A. F. Metais pesados nos sedimentos de corrente como indicadores de risco ambiental - Vale do Rio dos Sinos, RS. **Revista do Instituto Geológico**, v. 23, n. 2, p. 35-47, 2002.

- ROLLINSON, H. R. **Using geochemical data: evaluation, presentation, interpretation**, v.1, 1993.
- ROMANO, A.W. Folha Pará de Minas, SE.23-Z-C-IV: texto e mapa. Programa Geologia do Brasil – PGB. Belo Horizonte: CPRM/UFMG, 2007. 1 CD-ROM.
- RUDNICK, R. L. *et al.* Composition of the continental crust. **The crust**, v. 3, p. 1-64, 2003.
- RUSSEL M. A.; WALLING D. E.; HODGKINSON R. A. Suspended sediment sources in two small lowland agricultural catchments in the UK. **Journal of Hydrology**, v. 252, p. 1-24, 2001.
- SADEGHI, B. & COHEN, D. R. Category-based fractal modelling: A novel model to integrate the geology into the data for more effective processing and interpretation. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 226, p. 106783, 2021.
- SADEGHI, B.; MADANI, N.; CARRANZA, E. J. M. Combination of geostatistical simulation and fractal modeling for mineral resource classification. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 149, p. 59-73, 2015.
- SAHOO, P. K *et al.* Regional-scale mapping for determining geochemical *background* values in soils of the Itacaiúnas River Basin, Brazil: The use of compositional data analysis (CoDA). **Geoderma**, v. 376, p.114504, 2020b.
- SAHOO, P. K *et al.* Source and *background* threshold values of potentially toxic elements in soils by multivariate statistics and GIS-based mapping: a high density sampling survey in the Parauapebas basin, Brazilian Amazon. **Environmental geochemistry and health**, v. 42, n. 1, p. 255-282, 2020.
- SAHUQUILLO A *et al.*, P H. In: QUEVAUVILLER, Ph (Ed.). **Methodologies in soil and sediment fractionation studies: single and sequential extraction procedures**. Royal Society of Chemistry, 2002.
- SALOMÃO, G. N. *et al.* Geochemical distribution and threshold values determination of heavy metals in stream water in the sub-basins of Vermelho and Sororó rivers, Itacaiúnas River watershed, Eastern Amazon, Brazil. **Geochimica Brasiliensis**, v.32: p. 180–198, 2018.
- SALOMÃO, G. N. *et al.* Geochemical mapping and *background* concentrations of iron and potentially toxic elements in active stream sediments from Carajás, Brazil – implication for risk assessment. **Journal of South American Earth Sciences**, v.92, p.151–166, 2019b.
- SALOMÃO, G. N. *et al.* Geochemical mapping and estimation of *background* concentrations in soils of Carajás mineral province, eastern Amazonian Craton, Brazil. **Geochemistry: exploration, environment, analysis**, v. 19, n. 4, p. 431-447, 2019a.
- SALOMÃO, G. N. *et al.* Geochemical mapping in stream sediments of the Carajás Mineral Province, part 2: Multi-element geochemical signatures using Compositional Data Analysis (CoDA). **Journal of South American Earth Sciences**, v. 110, p. 103361, 2021.
- SALOMÃO, G. N. *et al.* Geochemical mapping in stream sediments of the Carajás Mineral Province: *Background* values for the Itacaiúnas River watershed, Brazil. **Applied geochemistry**, v.118, p.104608, 2020.

- SARKAR, S. K *et al.* Trace elements in surface sediments of the Hooghly (Ganges) estuary: distribution and contamination risk assessment. **Environmental geochemistry and health**, v. 39, n. 6, p. 1245-1258, 2017.
- SCHÖLL, W.U. Der Glied westliche Randbereich der Espinhaço- Zone, Minas Gerais, Brasilien. Hannover: Geol. Jb., Beih., 121: 59- 94, 1972.
- SCHORSCHER H. D. Komatiitos na estrutura “Greenstone Belt” Série Rio das Velhas, Quadrilátero Ferrífero, Minas Gerais, Brasil. Ins: SBG, Congresso Brasileiro de Geologia, 30, Anais, p.292-293, 1986.
- SILVA L. F. F. *et al.* Mercury accumulation in sediments of a mangrove ecosystem in SE Brazil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 145, n. 1, p. 67-77, 2003.
- SILVA, M.A. *et al.* Mapa geológico do estado de Minas Gerais. Belo Horizonte: CPRM, Escala 1:1.000.000, 2020.
- SILVA, M.A. *et al.* Projeto Estratigrafia, Recursos Minerais e Arquitetura Crustal do Quadrilátero Ferrífero – mapa Geológico do Quadrilátero Ferrífero e seu Entorno. Belo Horizonte: CPRM, 1 mapa colorido. Escala 1:250.000, 2021.
- SILVA-FILHO, E. V. *et al.* Distribution of trace metals in stream sediments along the Trans-Amazonian Federal Highway, Pará State, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 54, p. 182-195, 2014.
- SIVAKUMAR, S. *et al.* Assessment of heavy metal enrichment and the degree of contamination in coastal sediment from South East Coast of Tamilnadu, India. **Journal of Heavy Metal Toxicity and Diseases**, v. 1, n. 2, p. 1-8, 2016.
- SOARES M. C. C. Avaliação Geoambiental da Bacia Hidrográfica do Arroio do Salso, Porto Alegre – RS. Dissertação de Mestrado. 100p. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2002.
- SPADONI, M. Geochemical mapping using a geomorphologic approach based on catchments. **Journal of Geochemical Exploration**, v. 90, n. 3, p. 183-196, 2006.
- ŠTRBAC, S.; GRUBIN, M. K.; VASIĆ, N. Importance of *background* values in assessing the impact of heavy metals in river ecosystems: case study of Tisza River, Serbia. **Environmental geochemistry and health**, v. 40, n. 4, p. 1247-1263, 2018.
- SUMNER, M. E. (Ed.). **Handbook of soil science**. CRC press, 1999.
- TABACHNICK, B. G.; FIDELL, L. S. Using multivariate statistics., 4th edn.(Allyn & Bacon: Needham Heights, MA), 2001.
- TAKENO N. Atlas of Eh-pH diagrams - Intercomparison of thermodynamic databases. Open File Report of GSJ, no. 419. [S.l., s.n.], 287 p, 2005.
- TAN, W. *et al.* Adsorption and redox reactions of heavy metals on FeMn nodules from Chinese soils. *J. Colloid Interface Sci.* 284 (2), 600e605, 2005.
- TEIXEIRA W. *et al.* Archean and paleoproterozoic tectonic evolution of the São Francisco Craton. In: Cordani, U.G.; Milani, E.J.; Thomaz Filho, A.; Campos, D.A. (Ed.) International Geological Congress, Rio de Janeiro, 31, Tectonic evolution of South America, p. 101- 137, 2000.

UHLEIN, A. *Geologia e mineralogia da cromita e itabiritos da região do Serro MG. UnB.* Diss. Tese Mest., 192 pp., Brasília, 1982.

UHLEIN, A. **Transição cráton-faixa dobrada: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Aracuai (ciclo brasileiro) no estado de Minas Gerais: aspectos estratigráficos e estruturais.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1991.

UHLEIN, A.; EGYDIO-SILVA, M.; TROMPETTE, R. Faixa de dobramentos Aracuai no estado de Minas Gerais: uma cadeia monocíclica de idade brasileira. **Anais**, v. 6, p. 2576-2588, 1990.

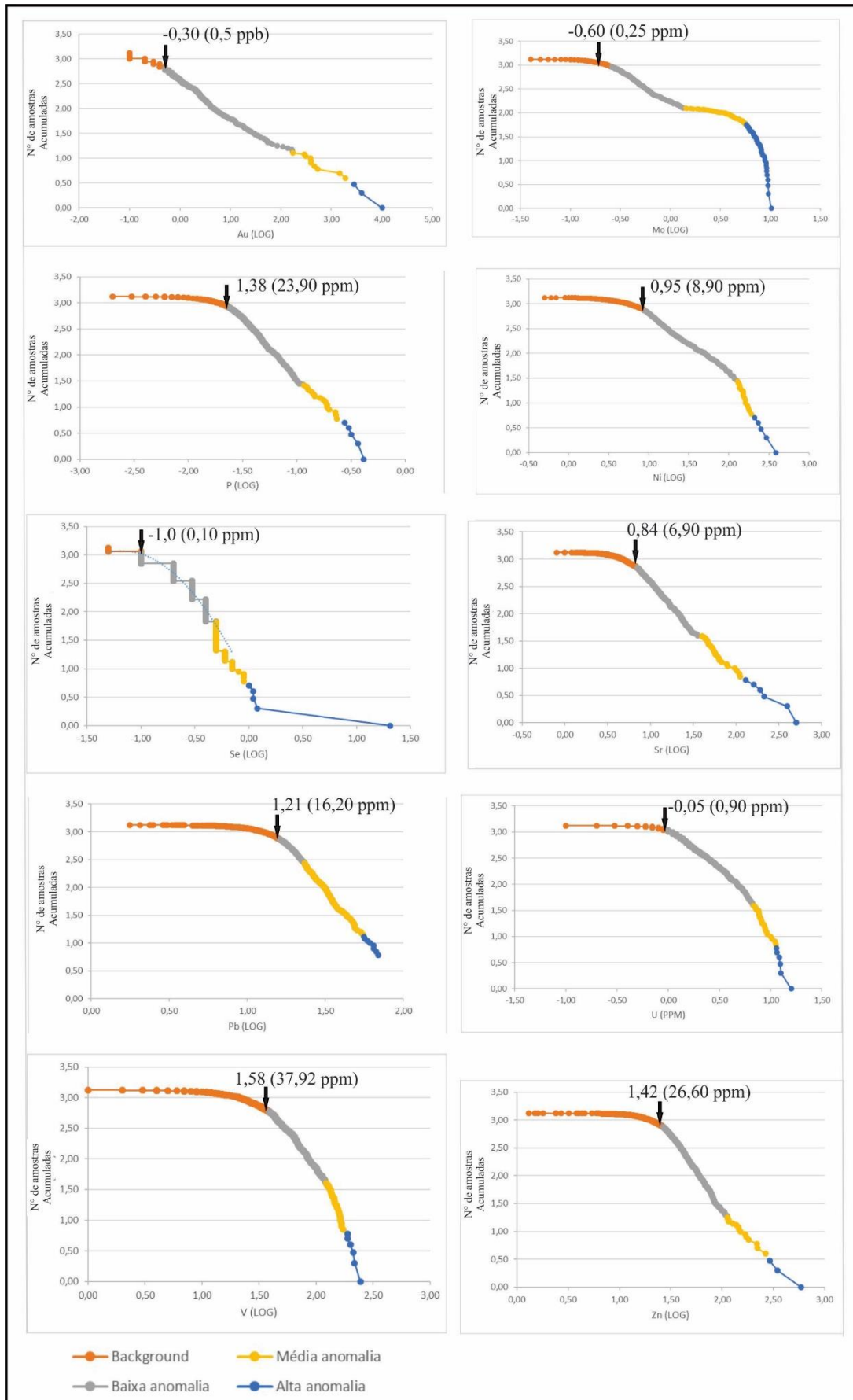
UNDA-CALVO, J. *et al.* Evaluating the role of particle size on urban environmental geochemistry of metals in surface sediments. **Science of the Total Environment**, v. 646, p. 121-133, 2019.

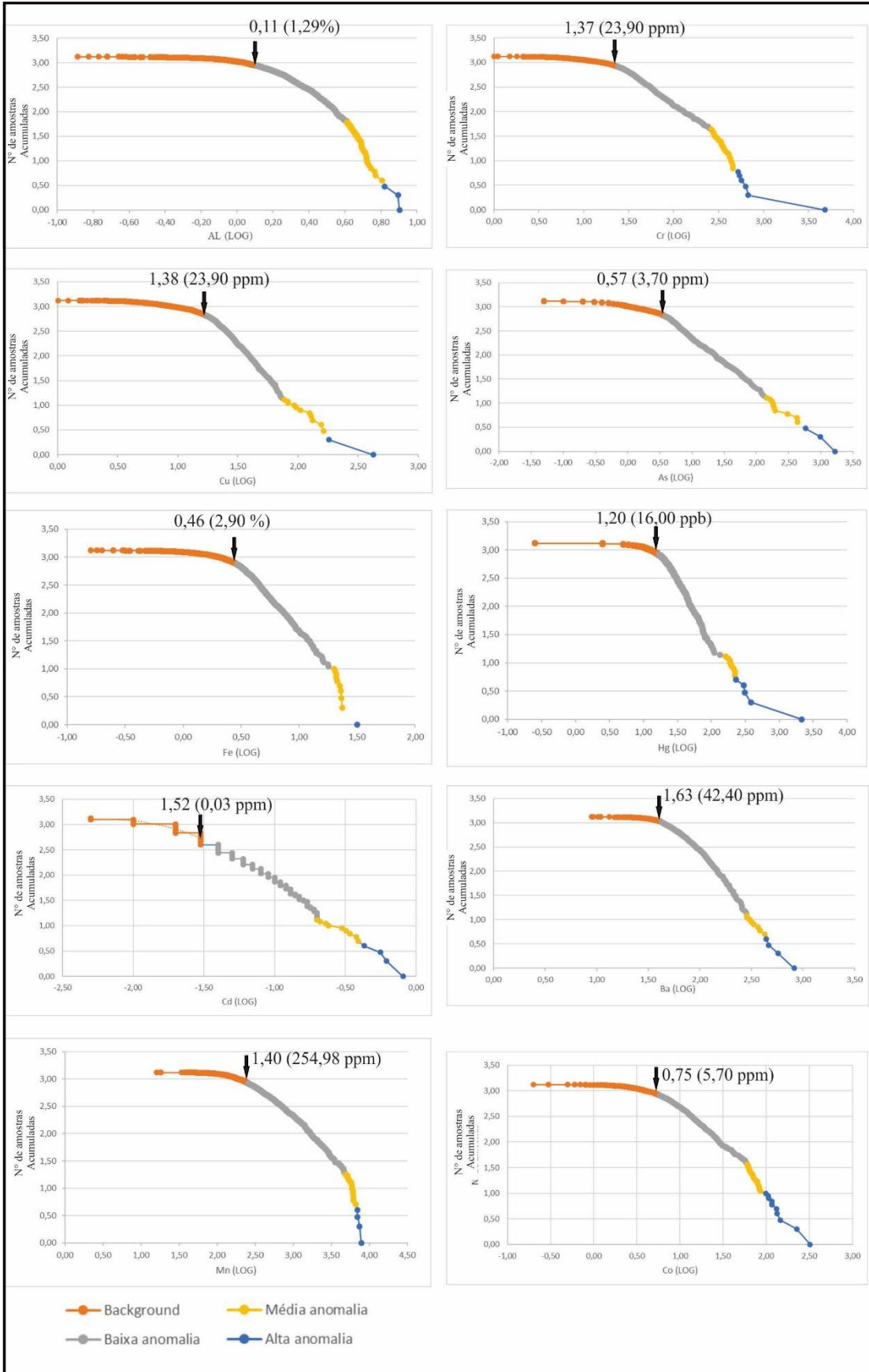
VICQ, R. *et al.* Iron Quadrangle, stream sediments, Brazil: geochemical maps and reference values. **Environmental Earth Sciences**, v. 74, n. 5, p. 4407-4417, 2015.

YUAN G. L. *et al.* Environmental geochemical mapping and multivariate geostatistical analysis of heavy metals in topsoils of a closed steel smelter: Capital Iron & Steel Factory, Beijing, China. **Journal of Geochemical Exploration**, v.130, p.15–21, 2013.

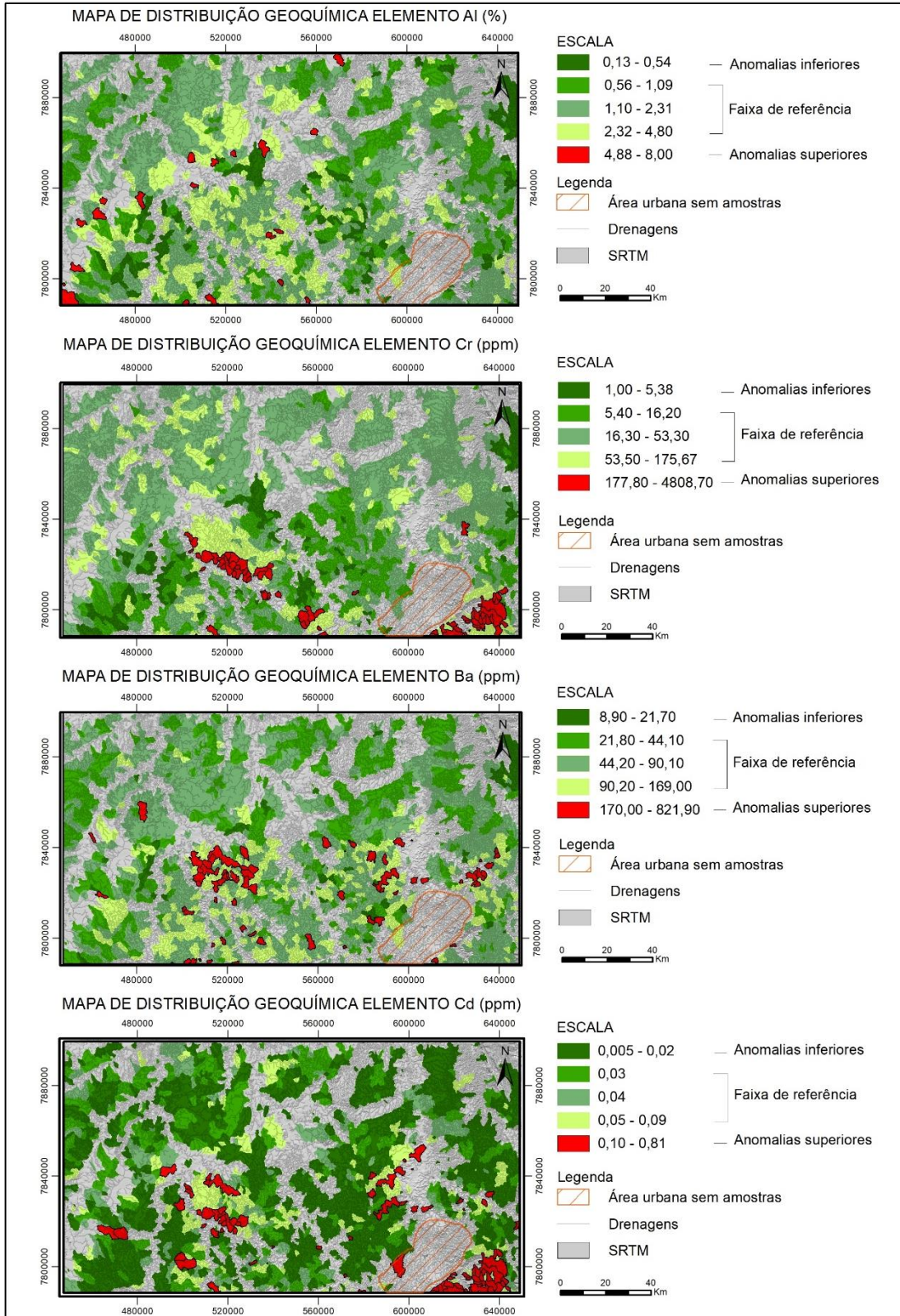
ANEXOS

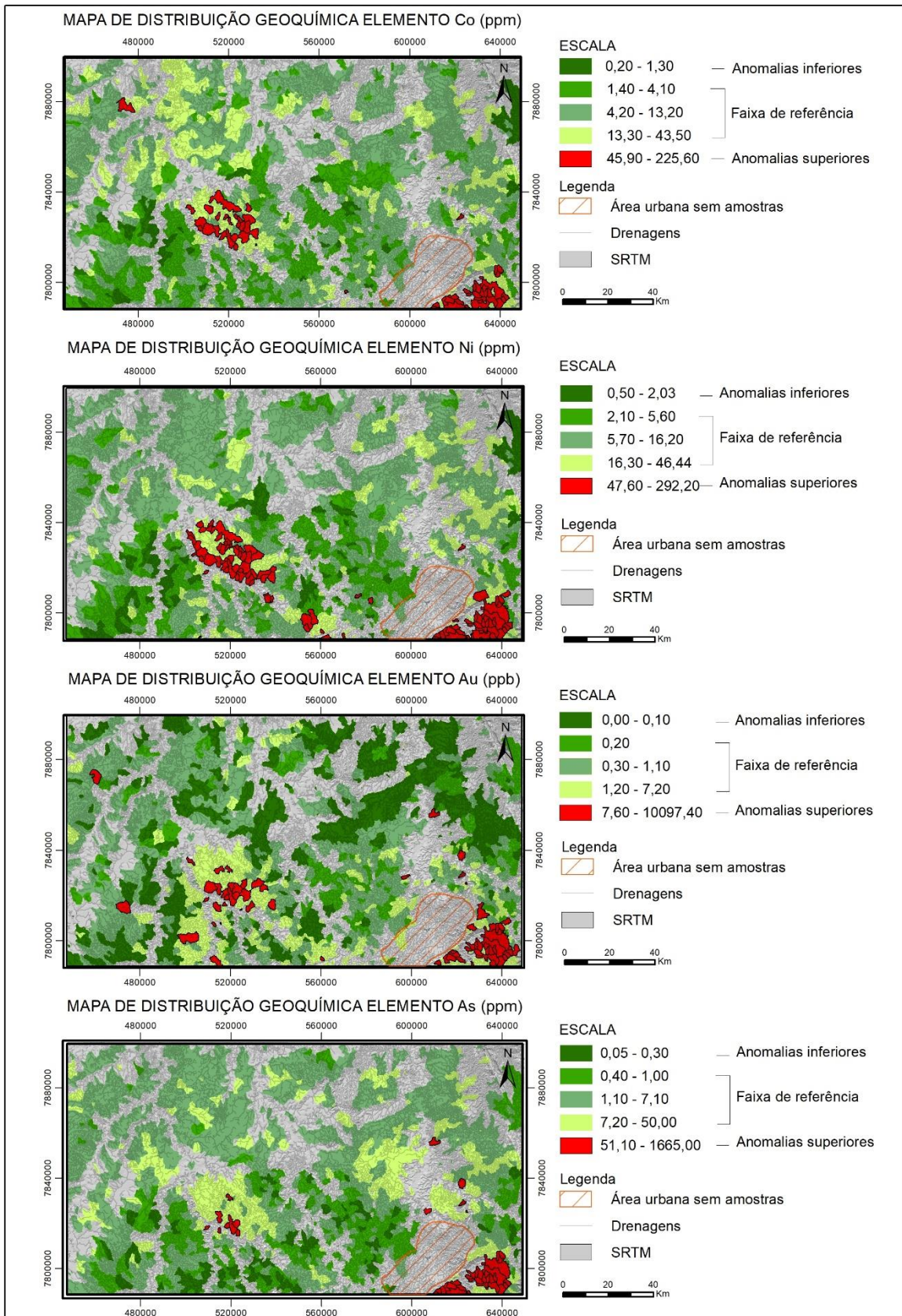
ANEXO A: Gráficos de definição de *background* através do método fractal.

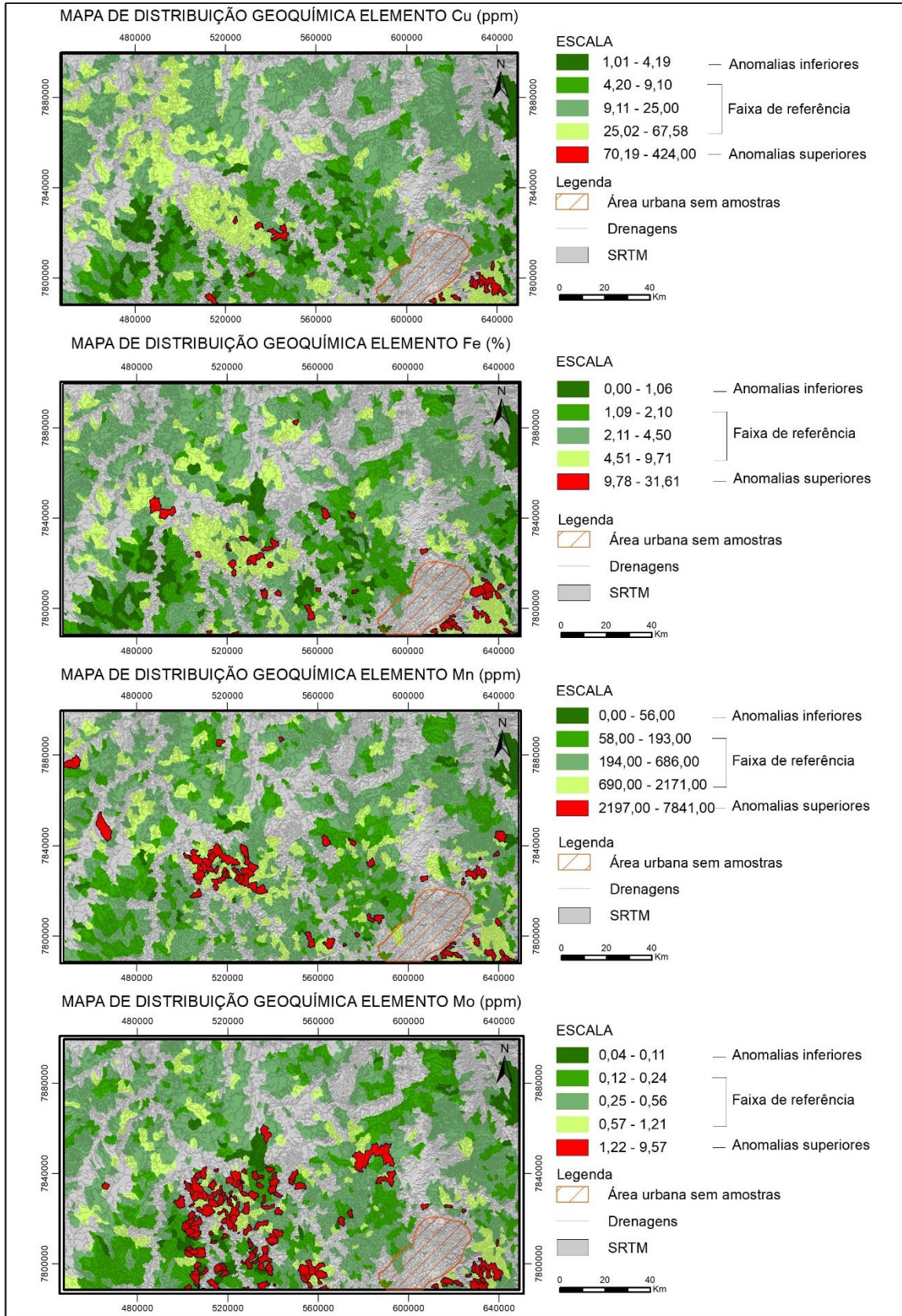


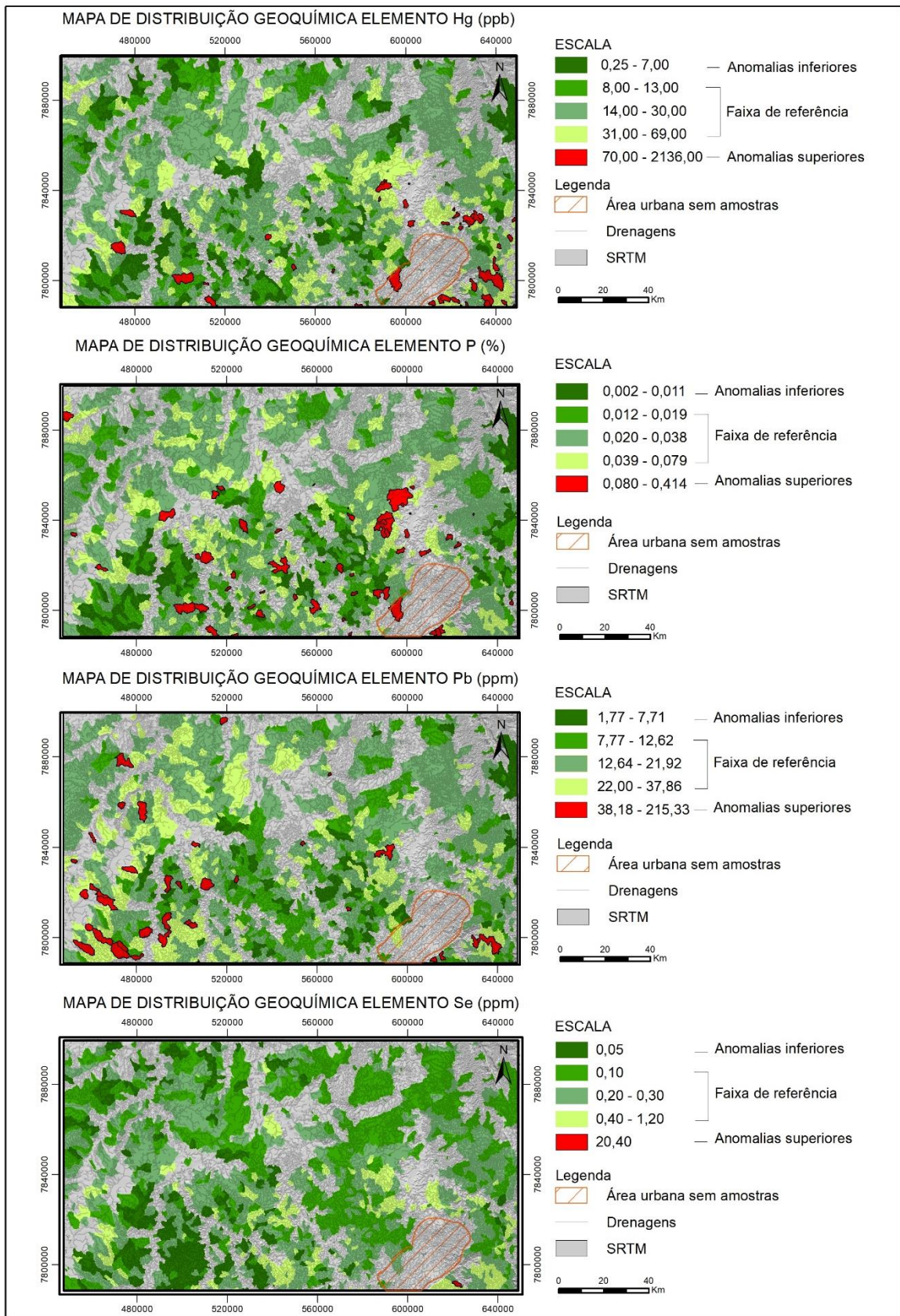


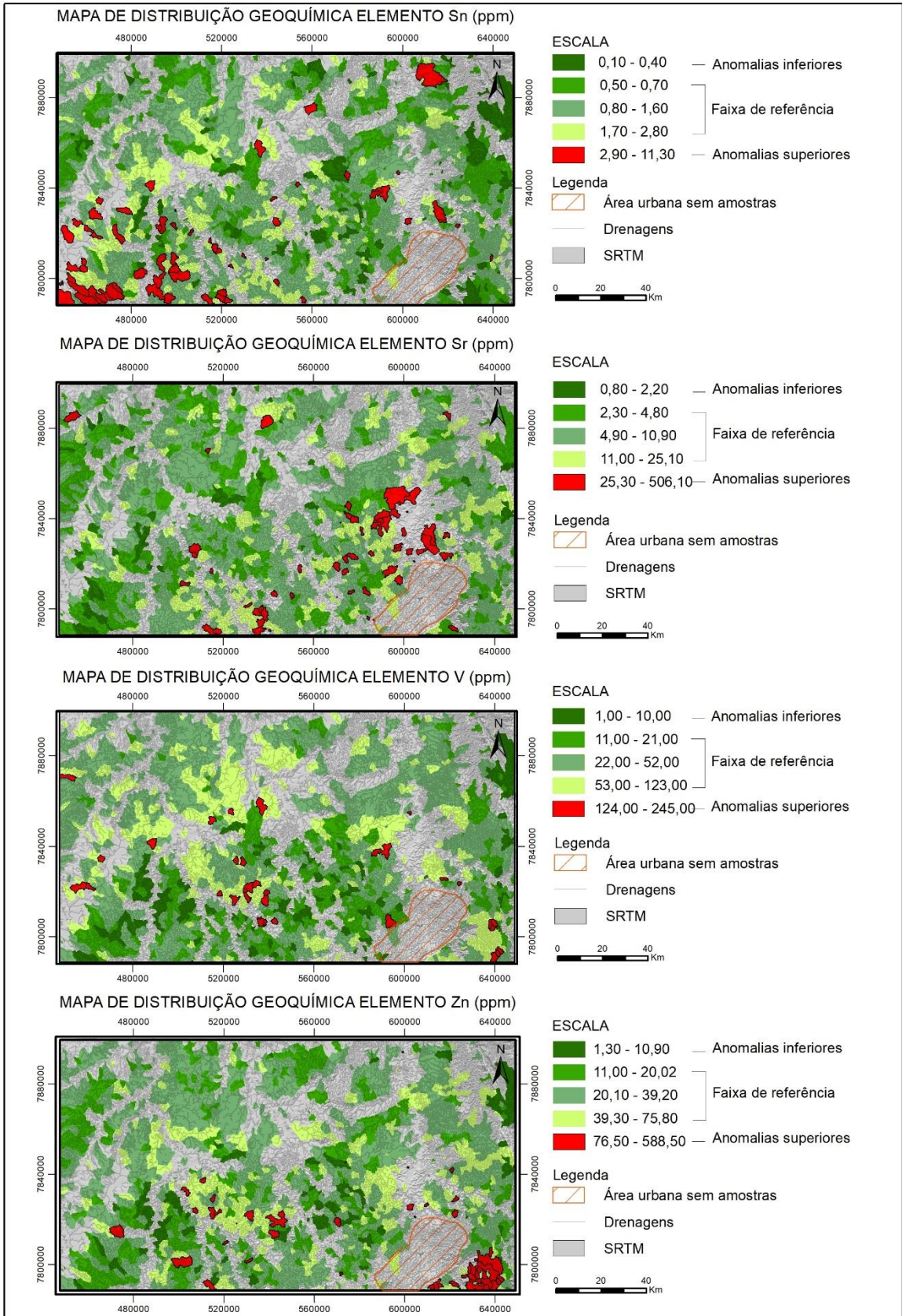
ANEXO B: Mapas de distribuição (*background*) dos elementos (Al, As, Au, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Se, Sn, Sr, U, V e Zn - MAD.

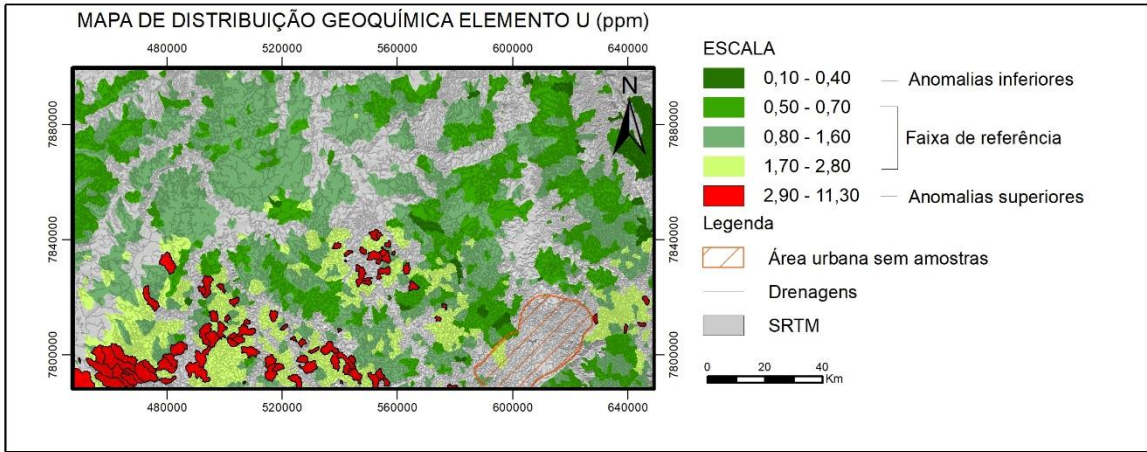




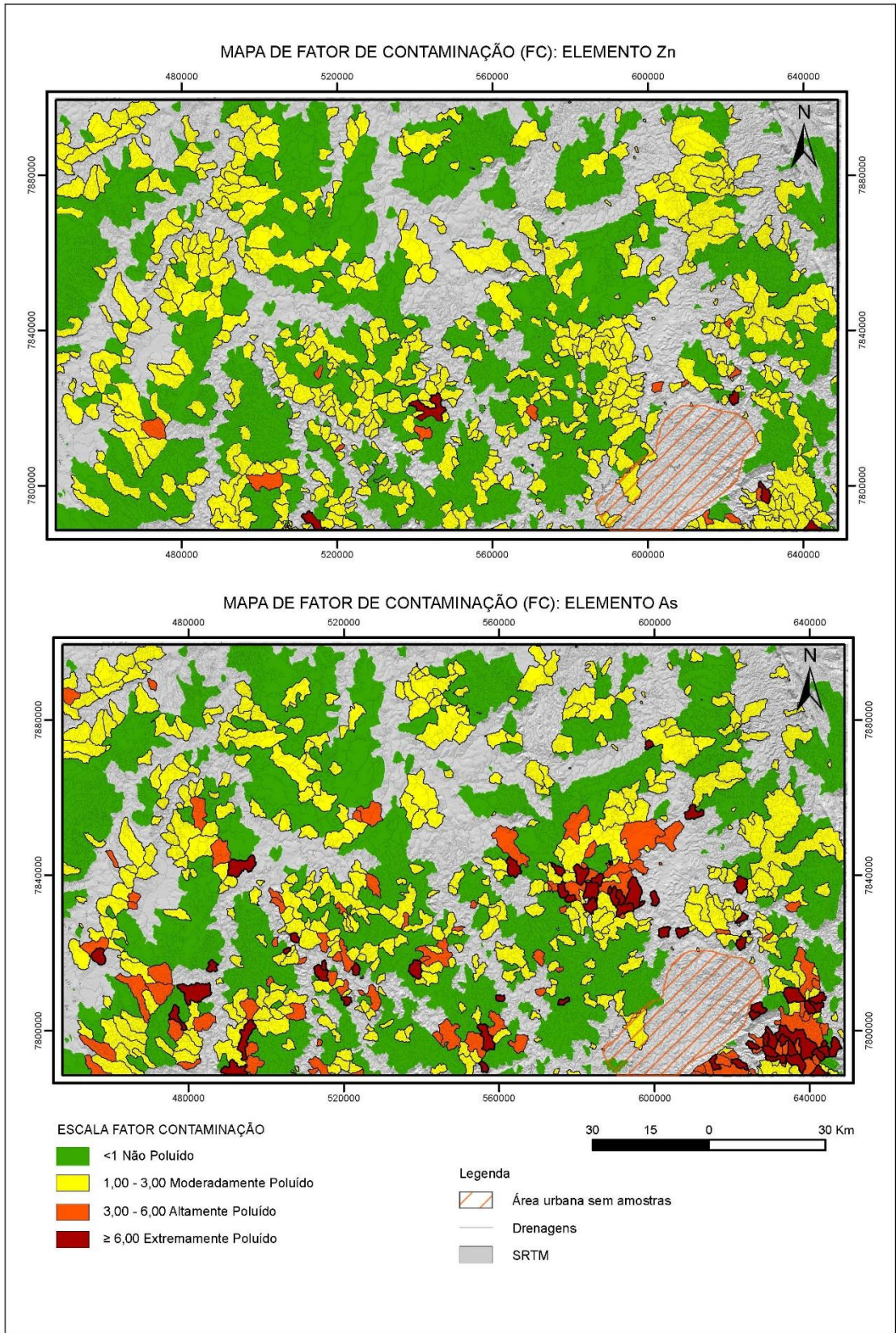


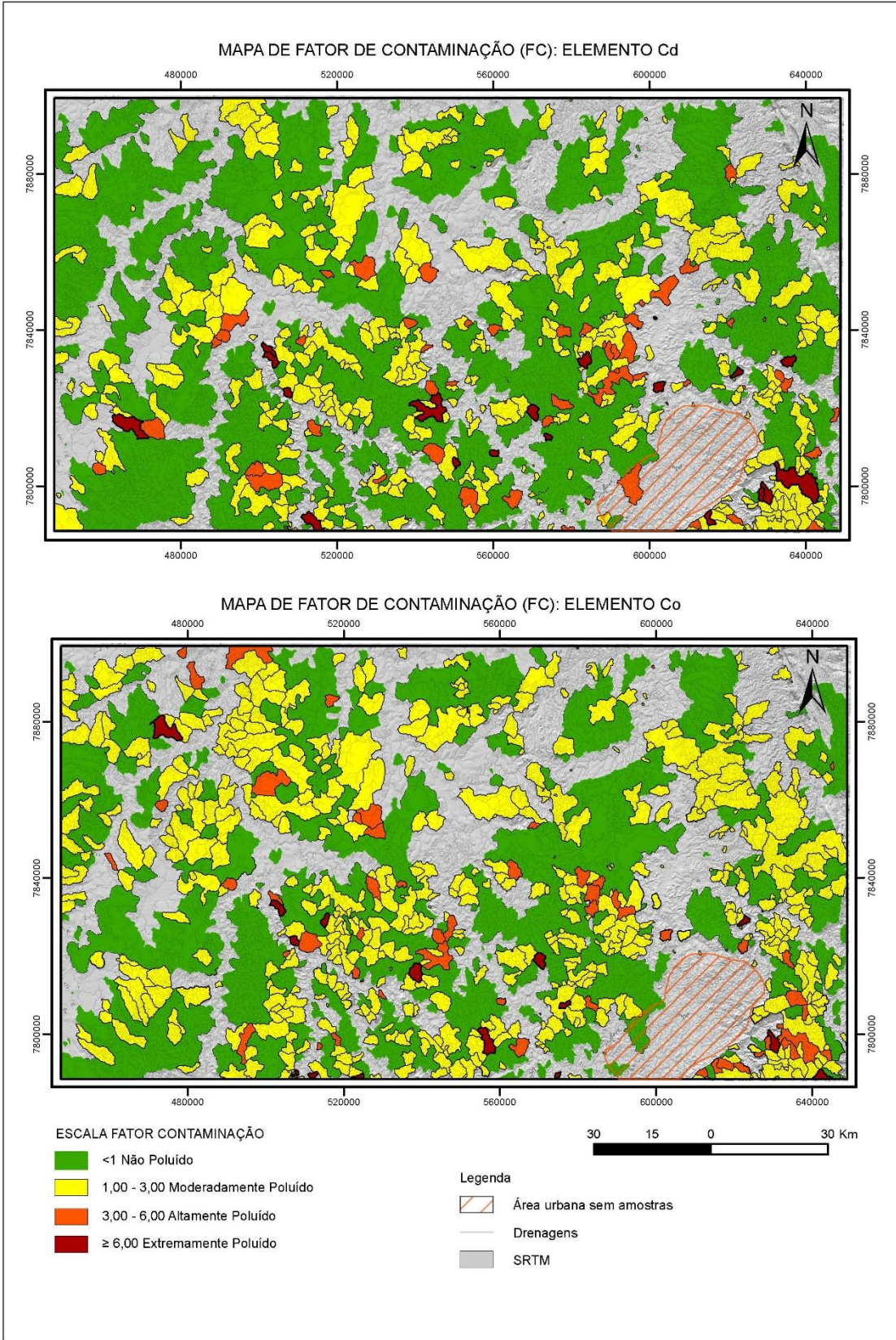


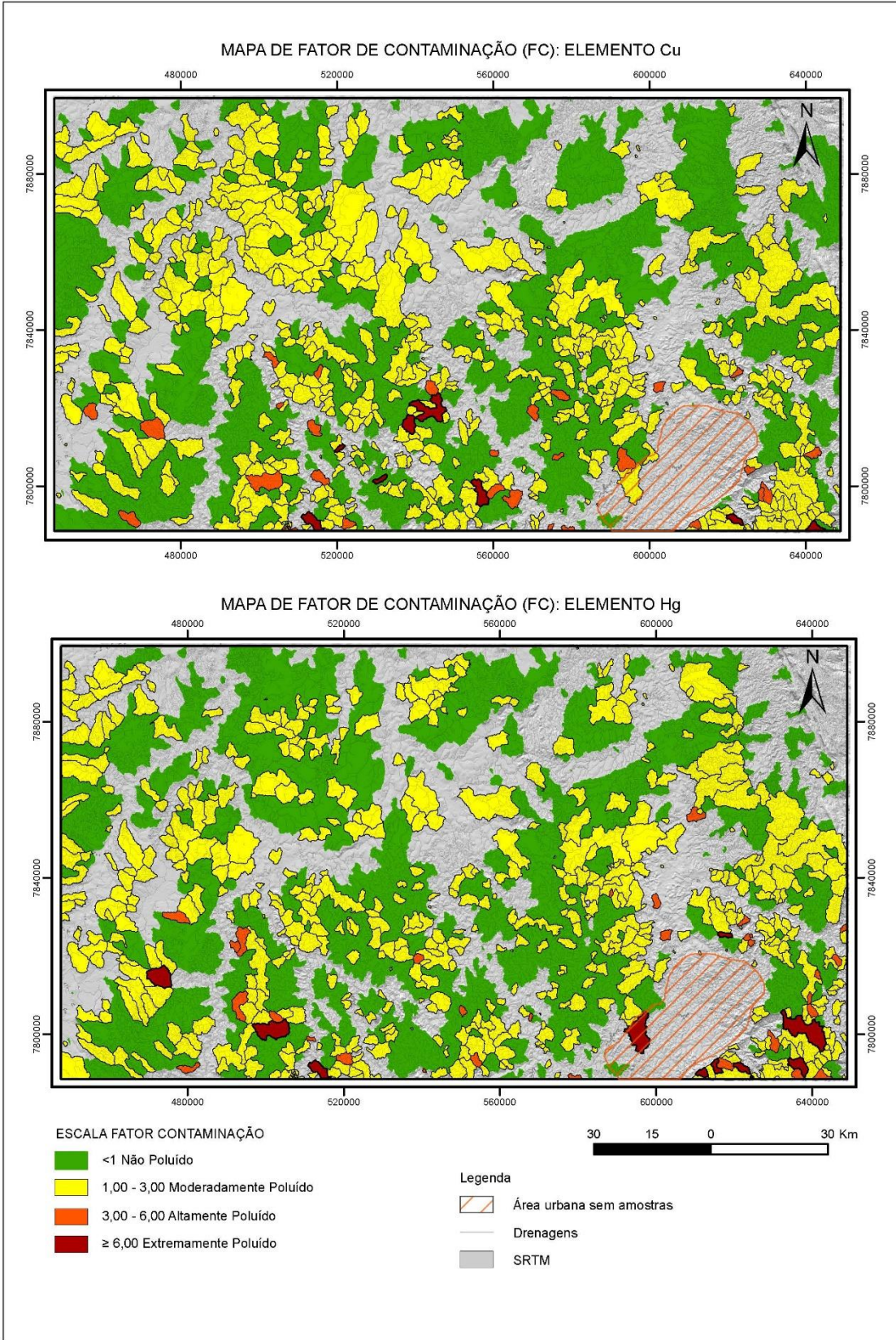


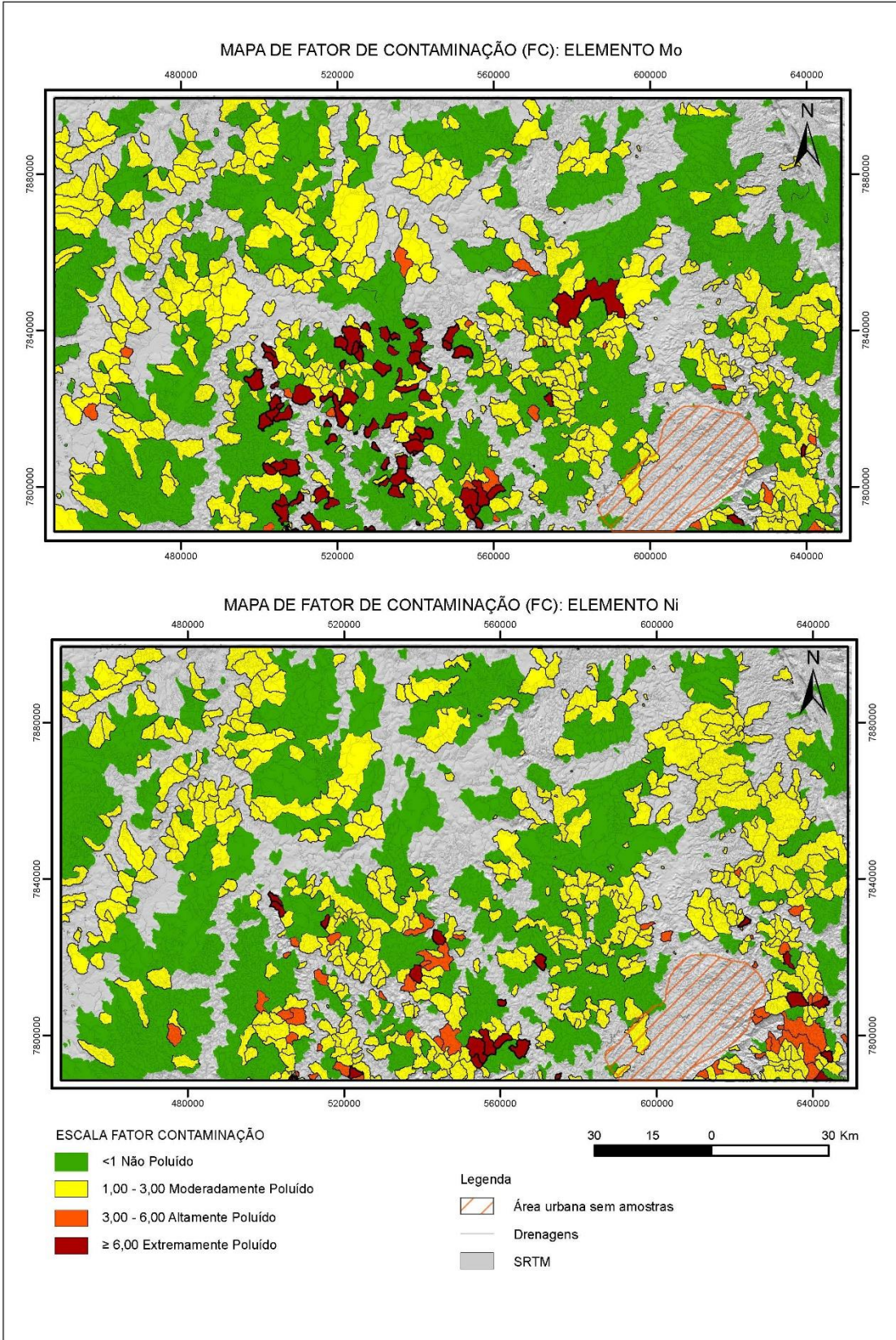


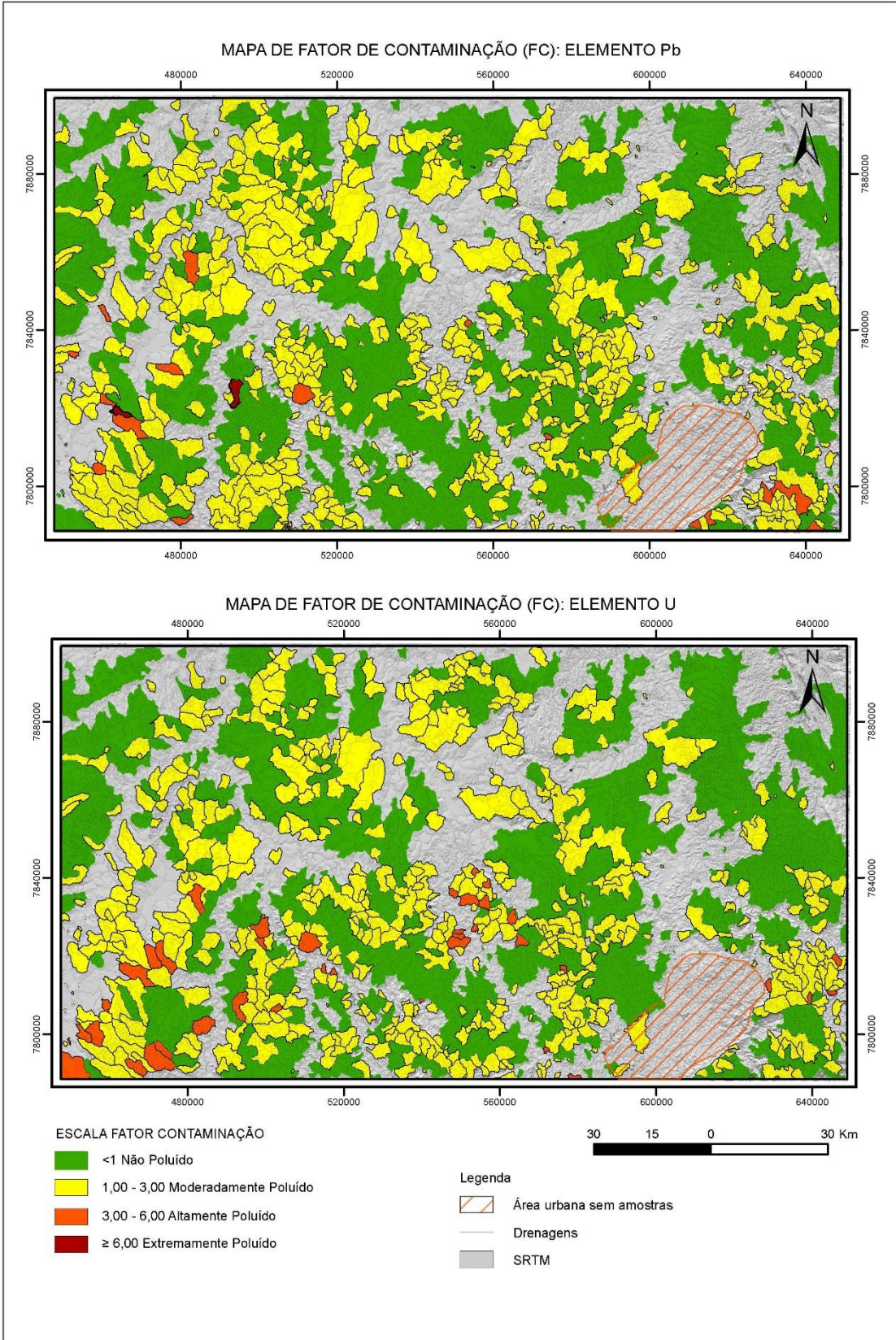
ANEXO C: Índices ambientais: Fator de contaminação (FC) dos elementos (As, Cd, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, U e Zn), tratamento por unidade geológica.



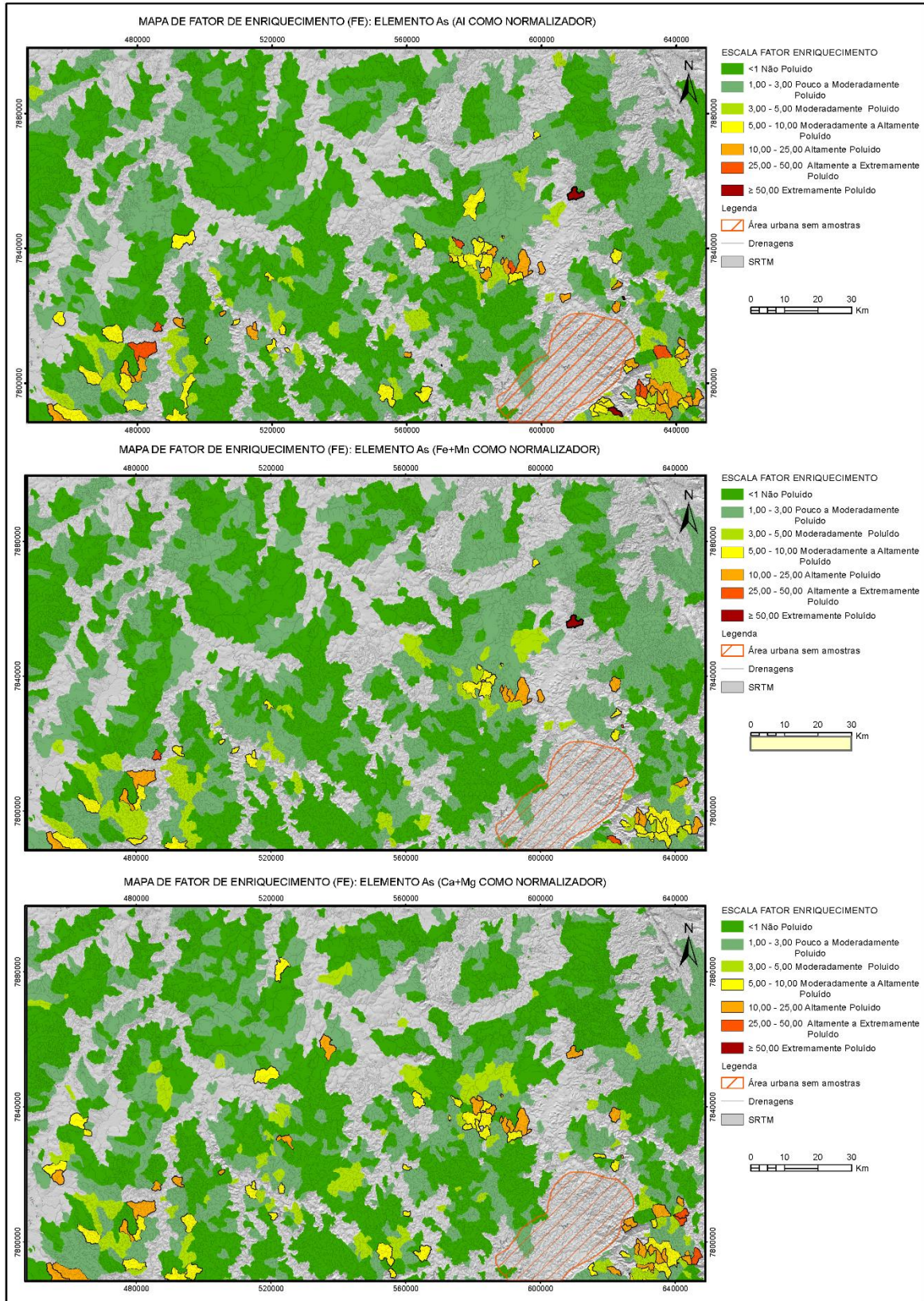


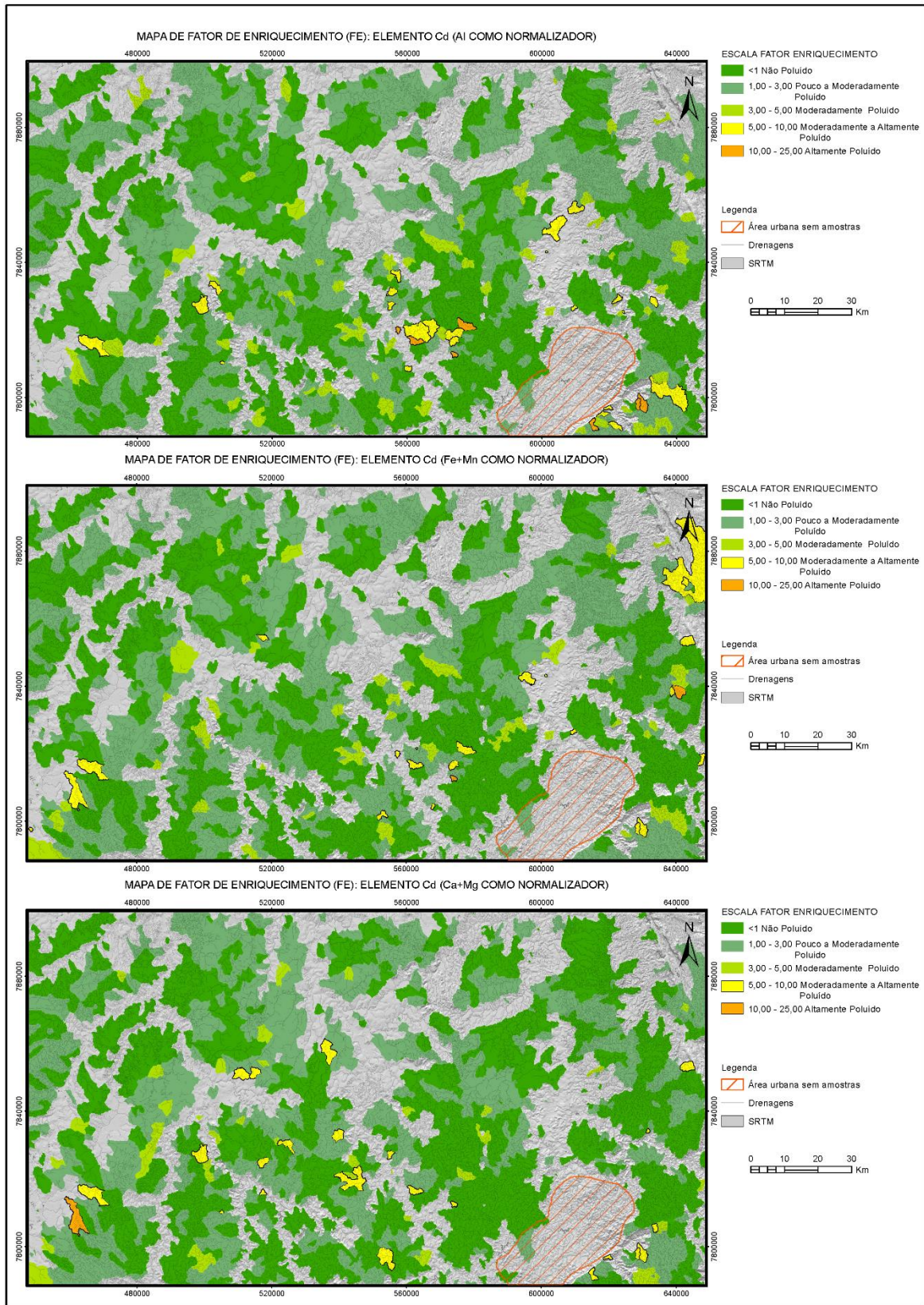


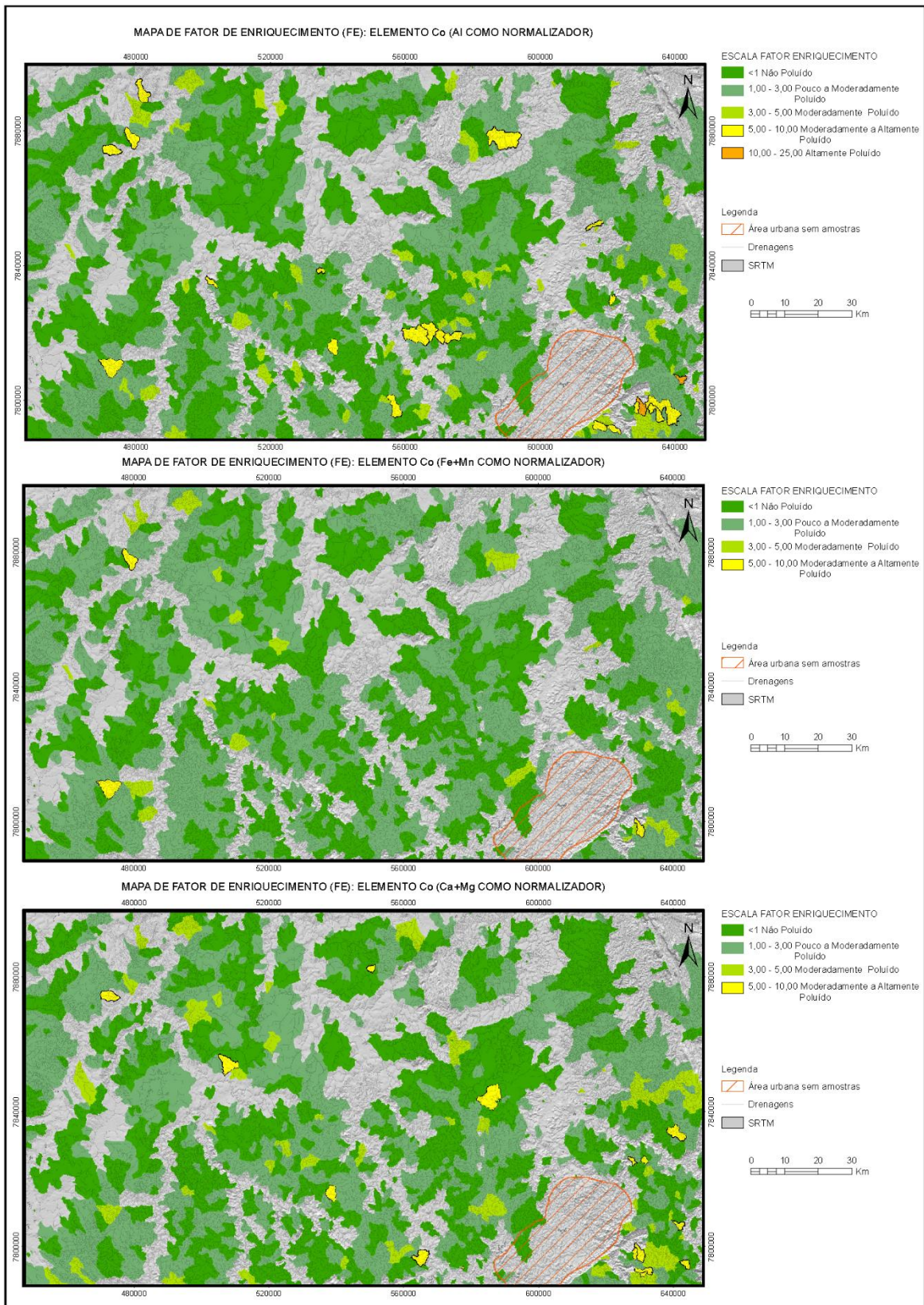


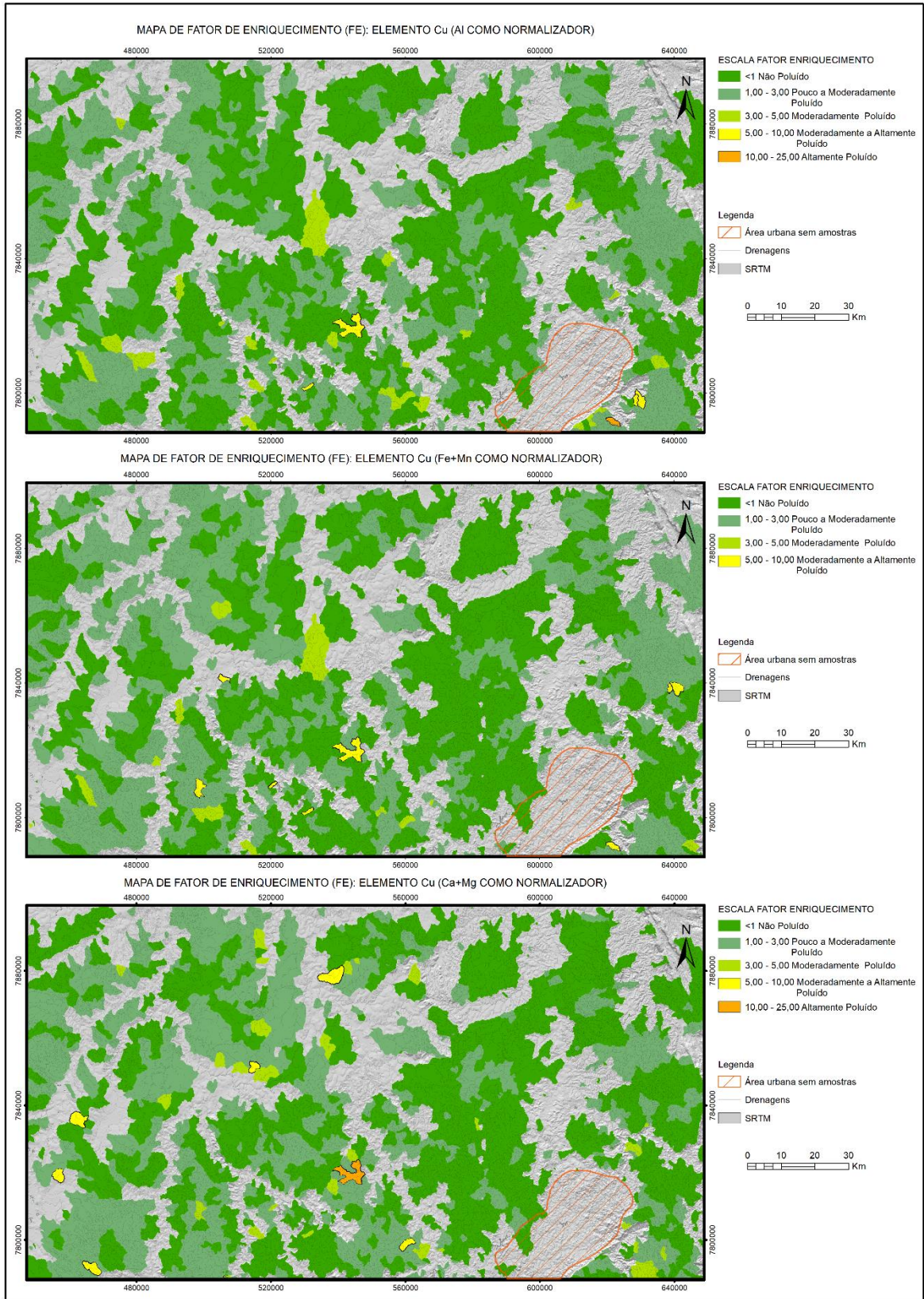


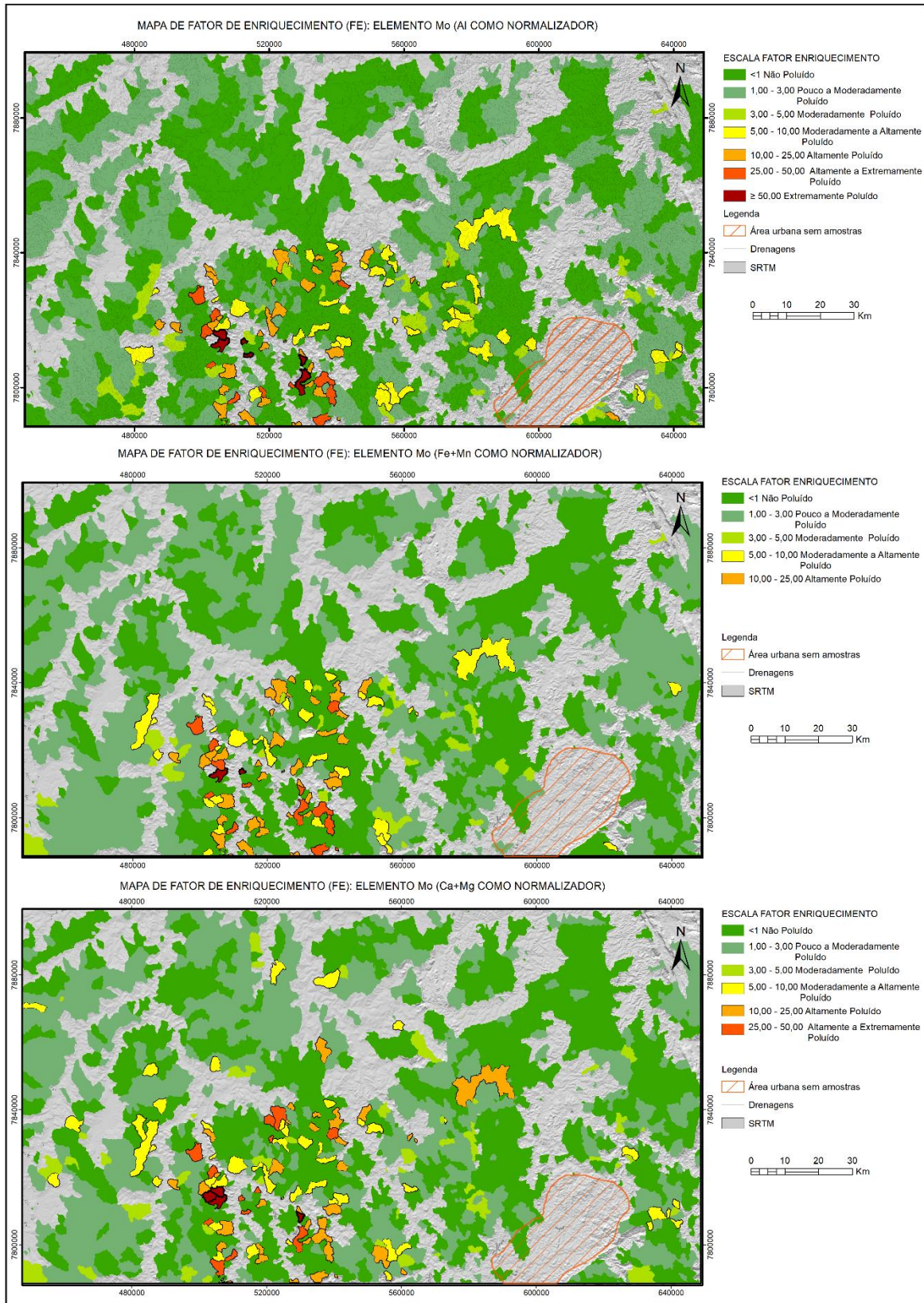
ANEXO D: Índices ambientais: Fator de enriquecimento (FE) dos elementos (As, Cd, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, U e Zn), tratamento por unidade geológica.

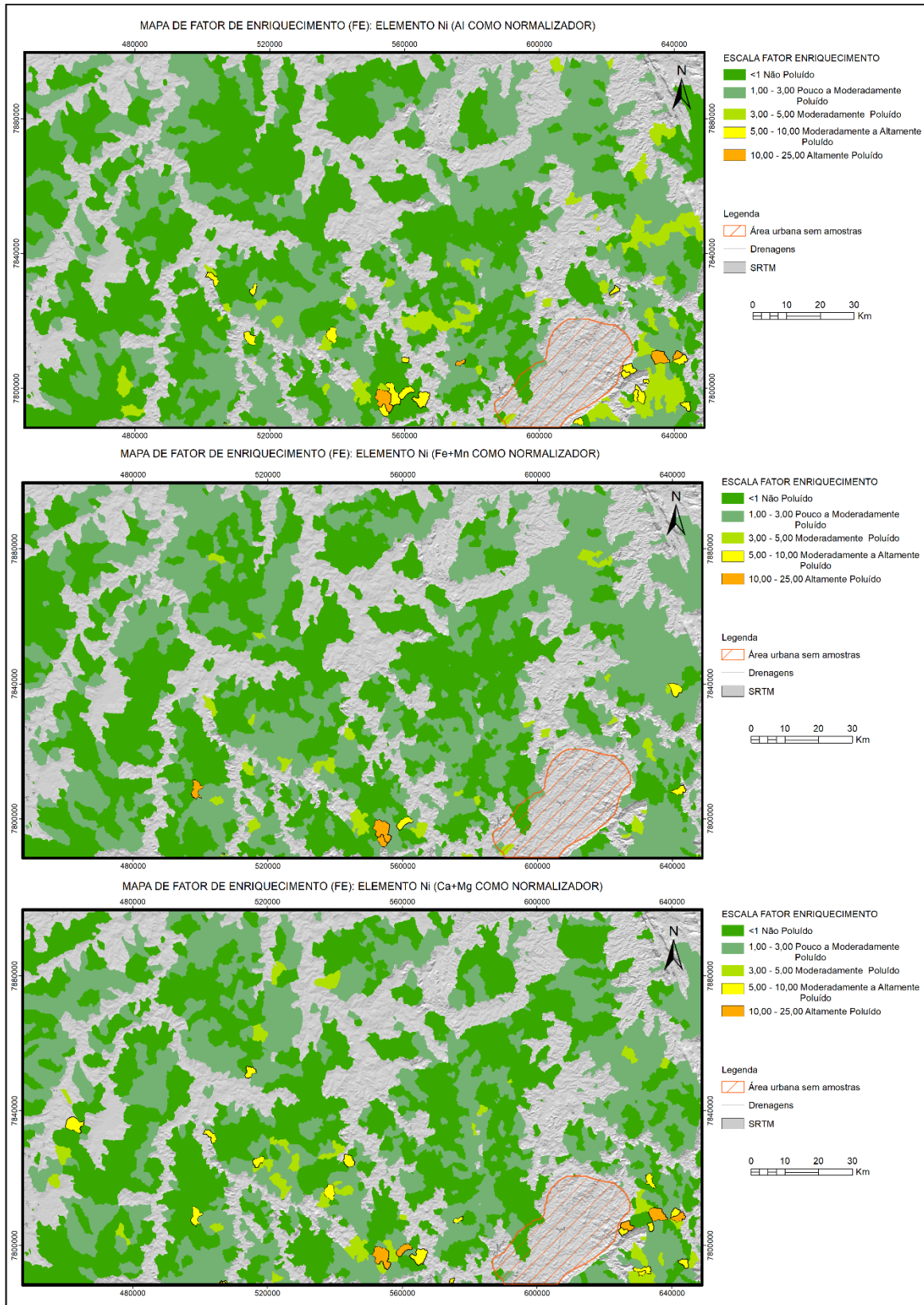


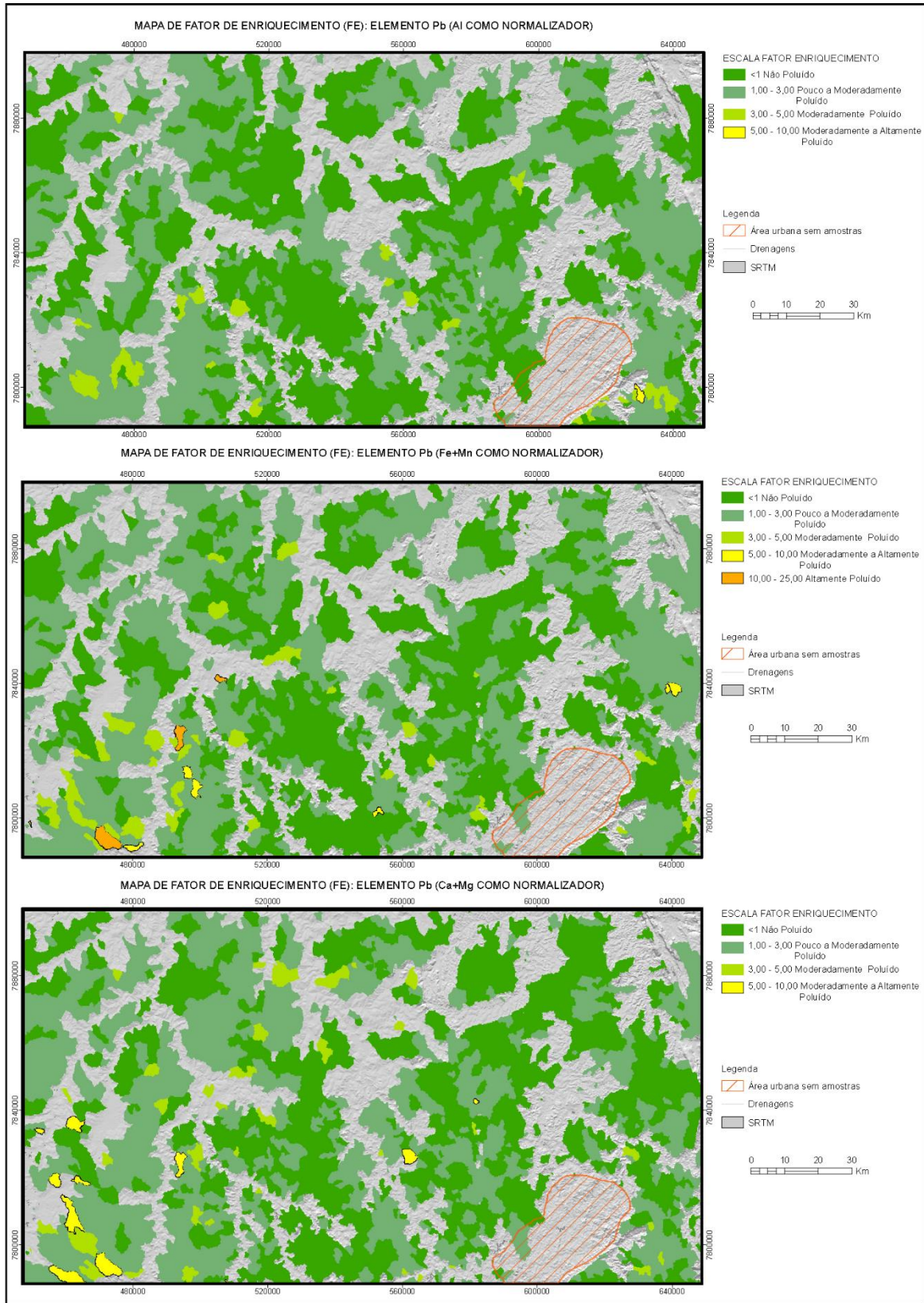


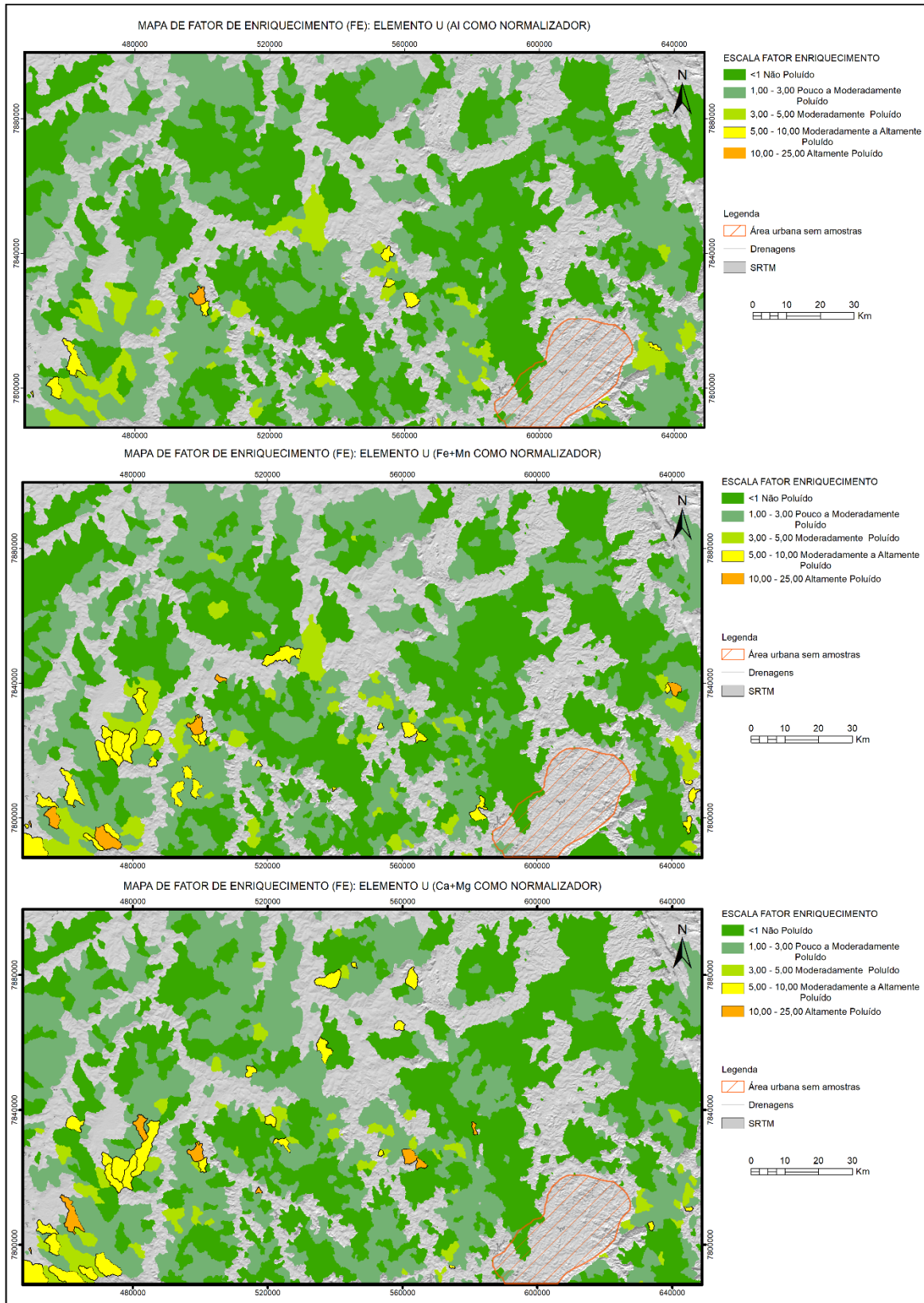


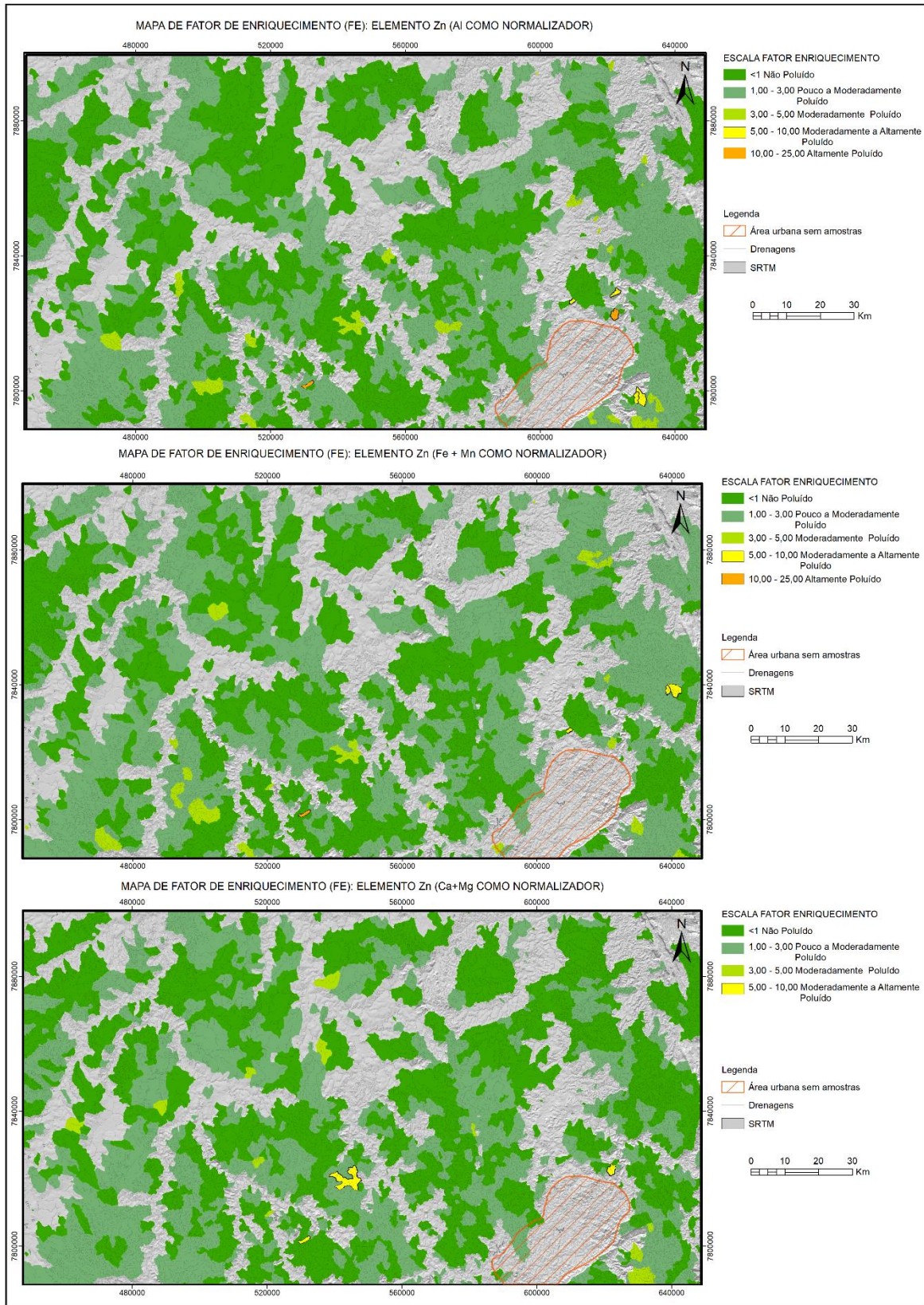




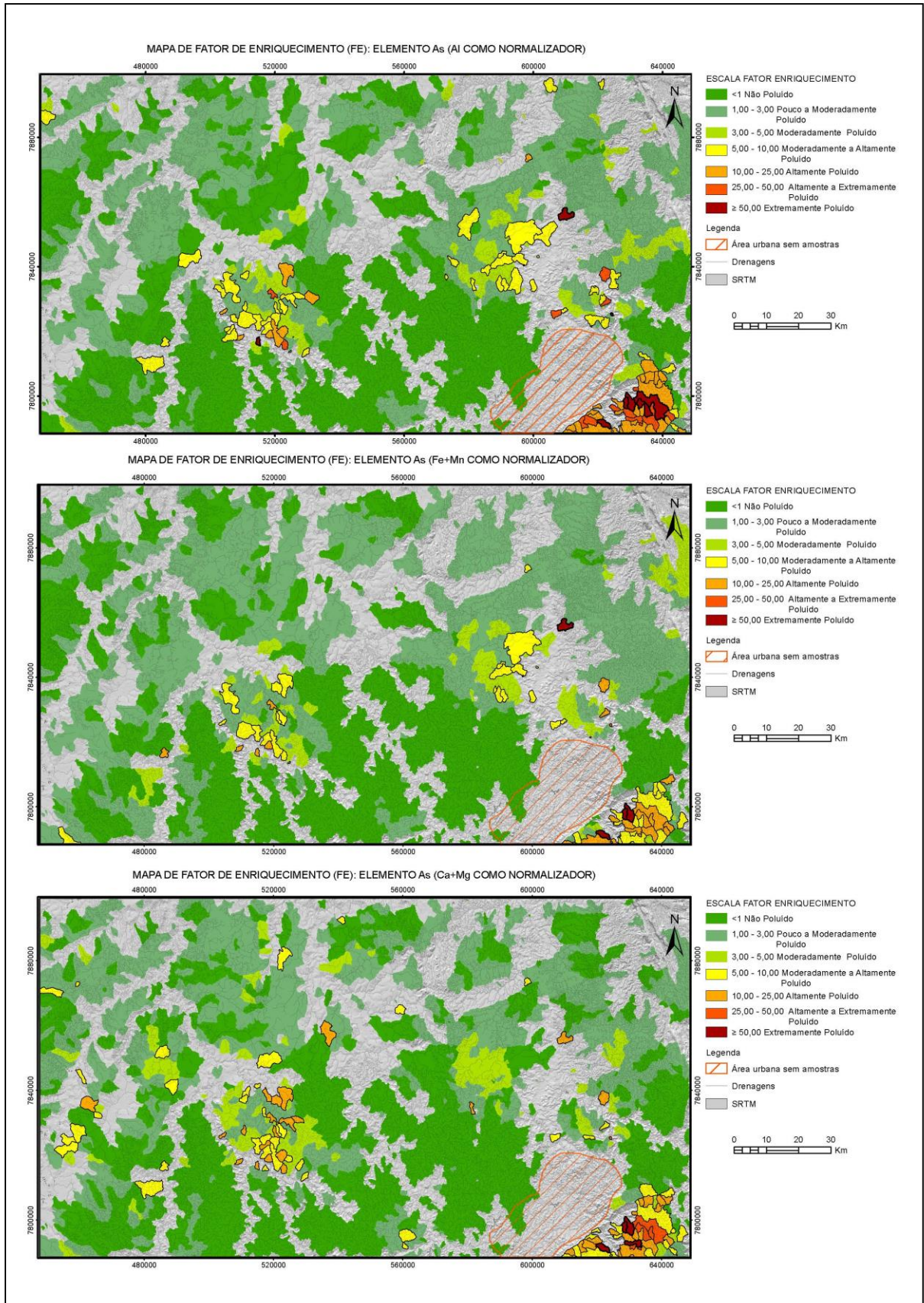


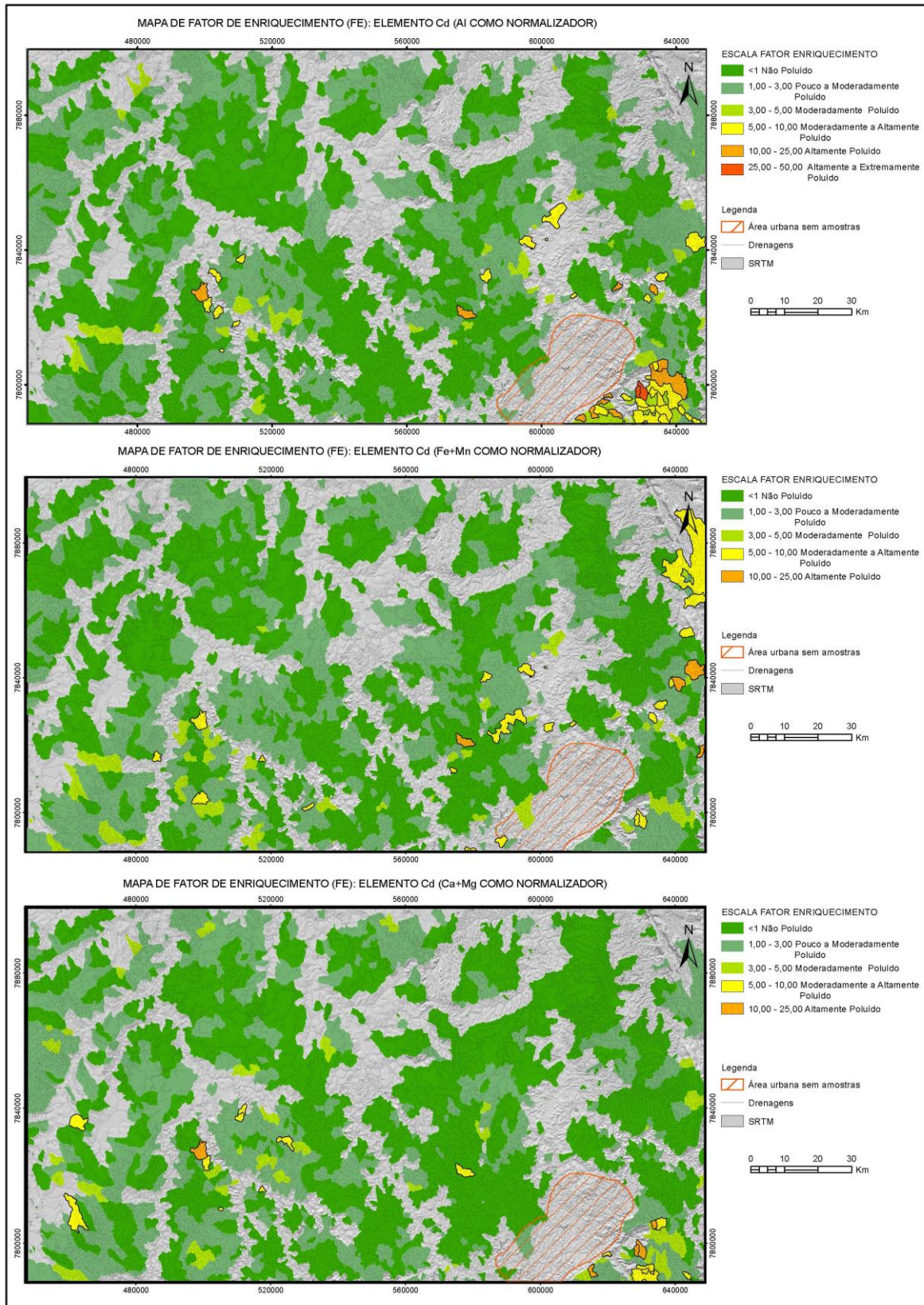


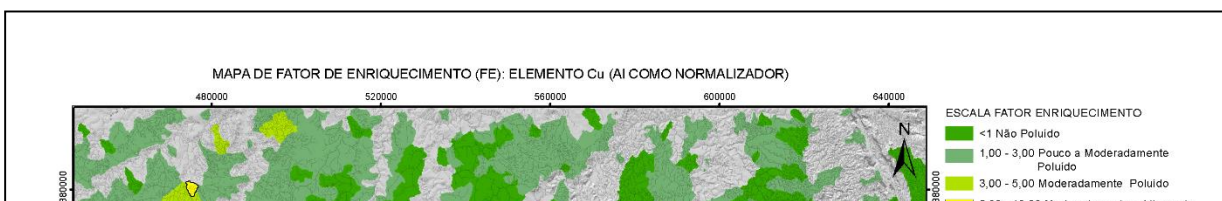
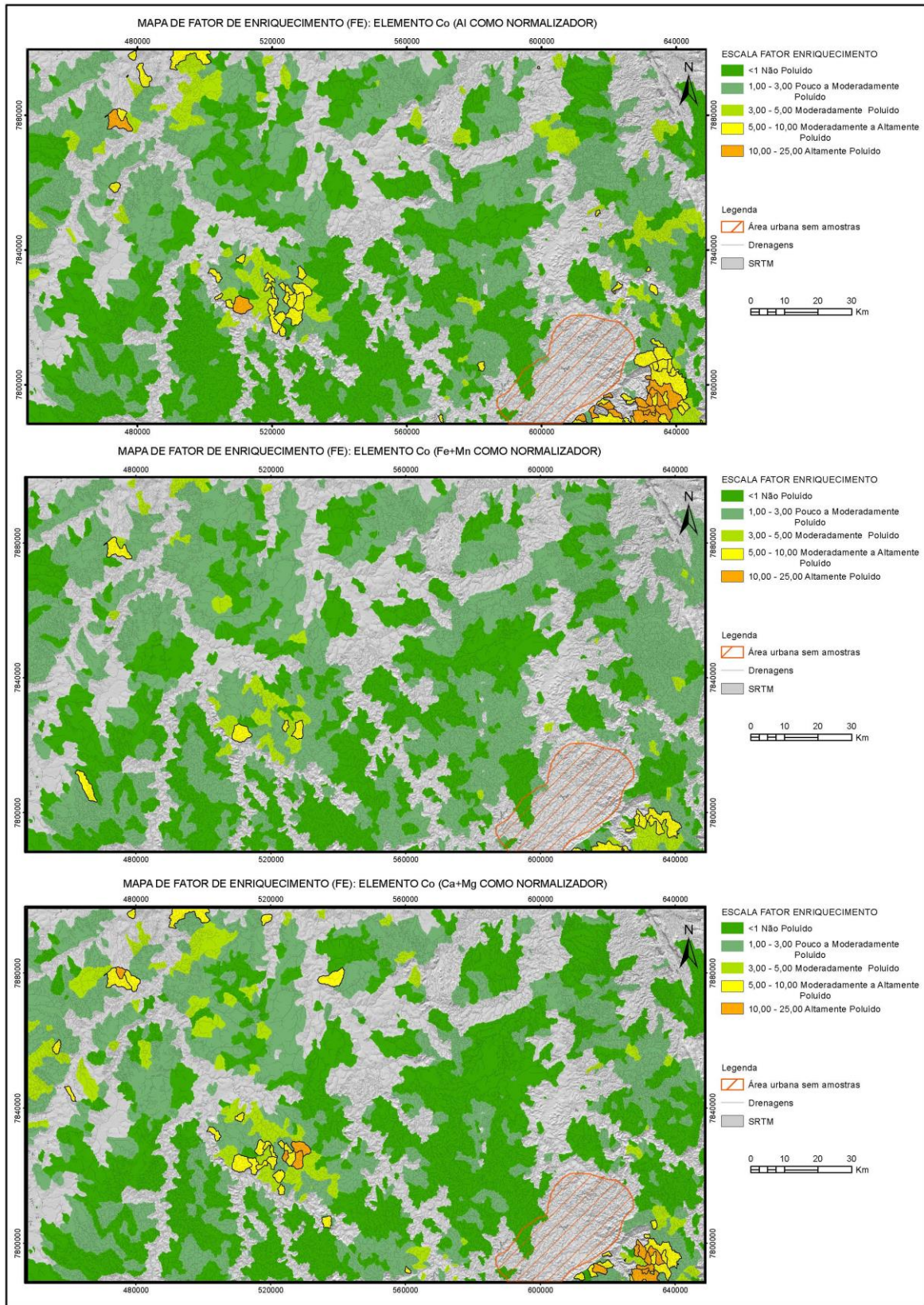


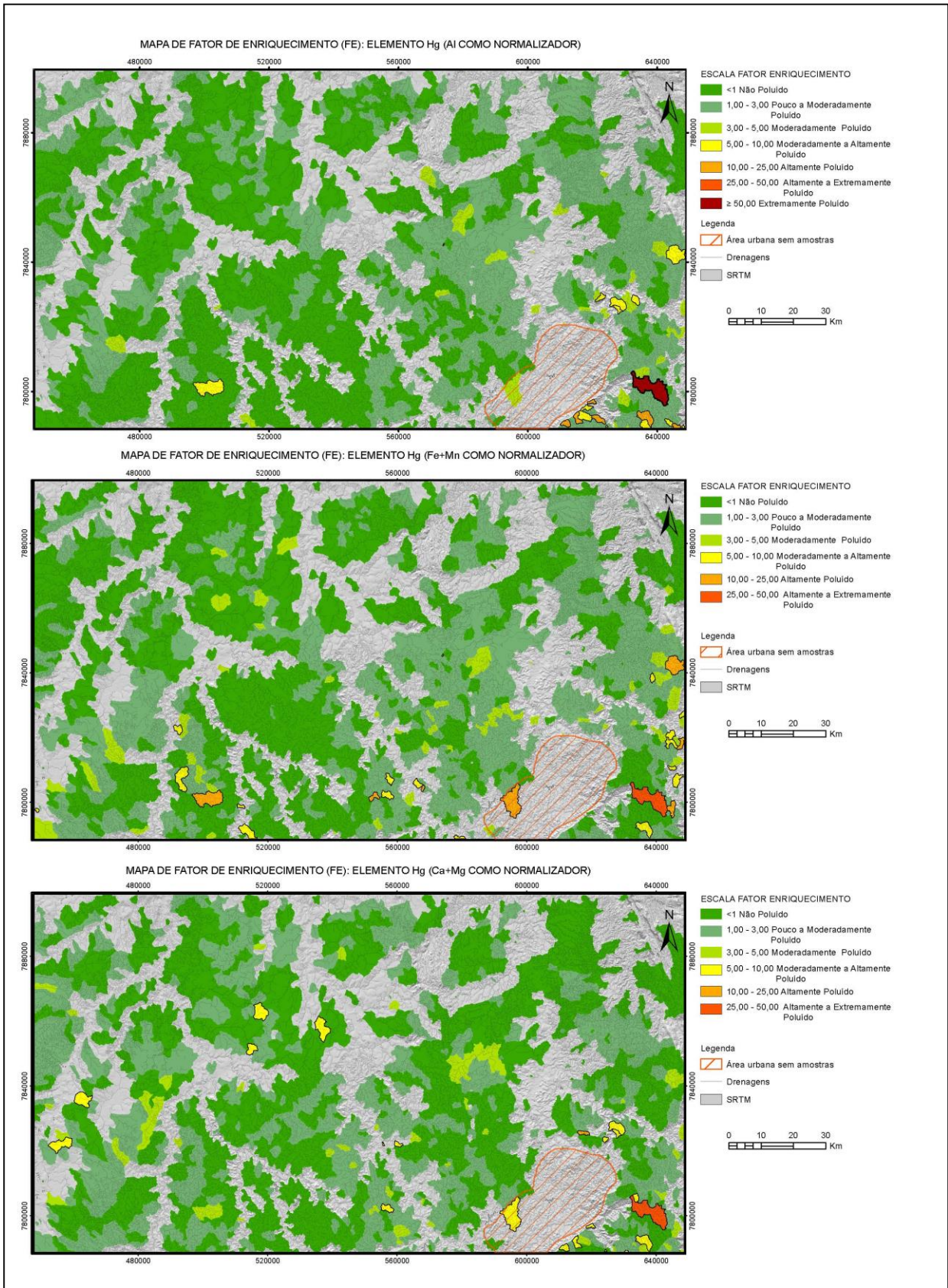


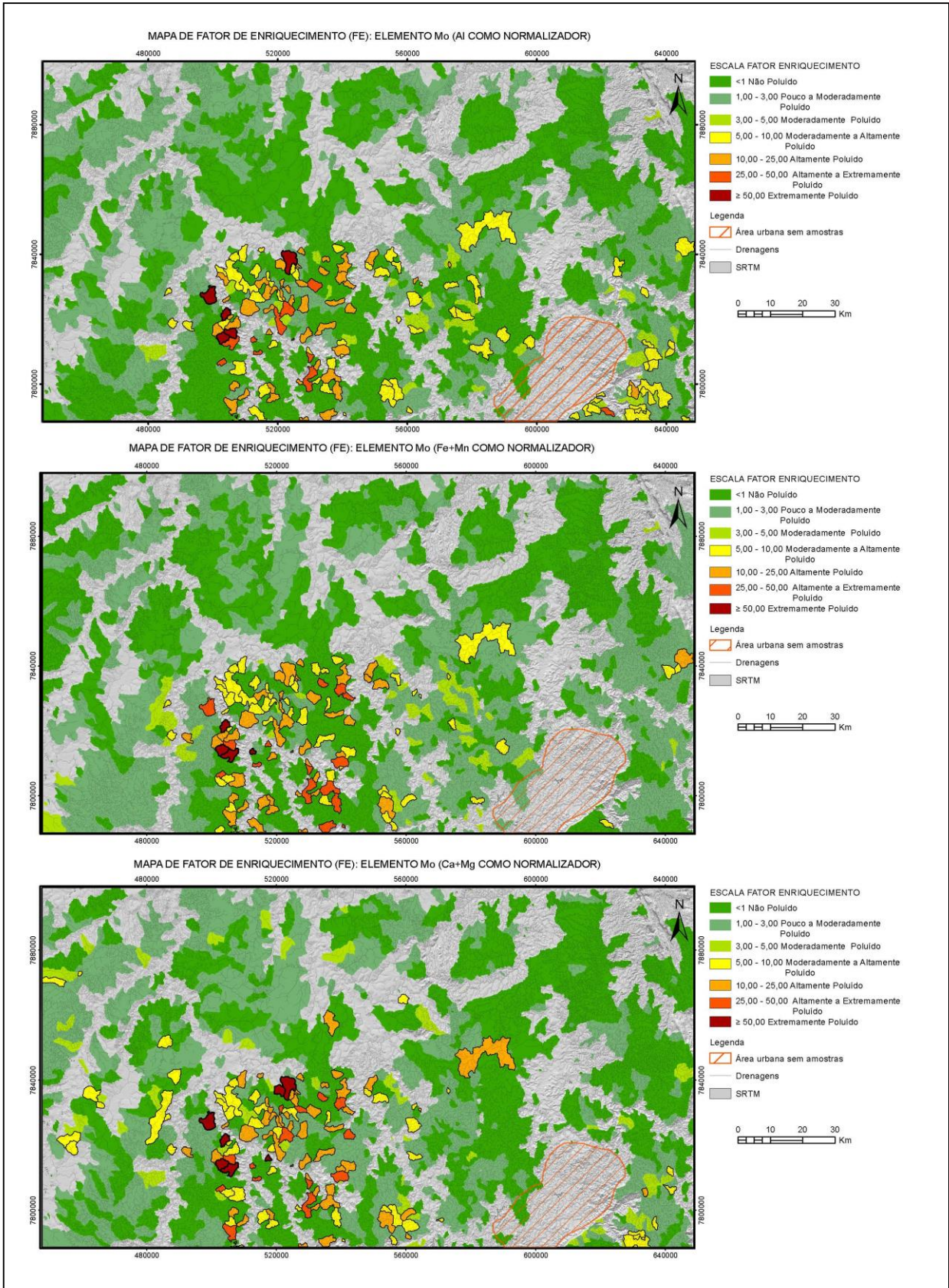
ANEXO E: Índices ambientais: Fator de enriquecimento (FE) dos elementos (As, Cd, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, U e Zn), tratamento global dos dados.

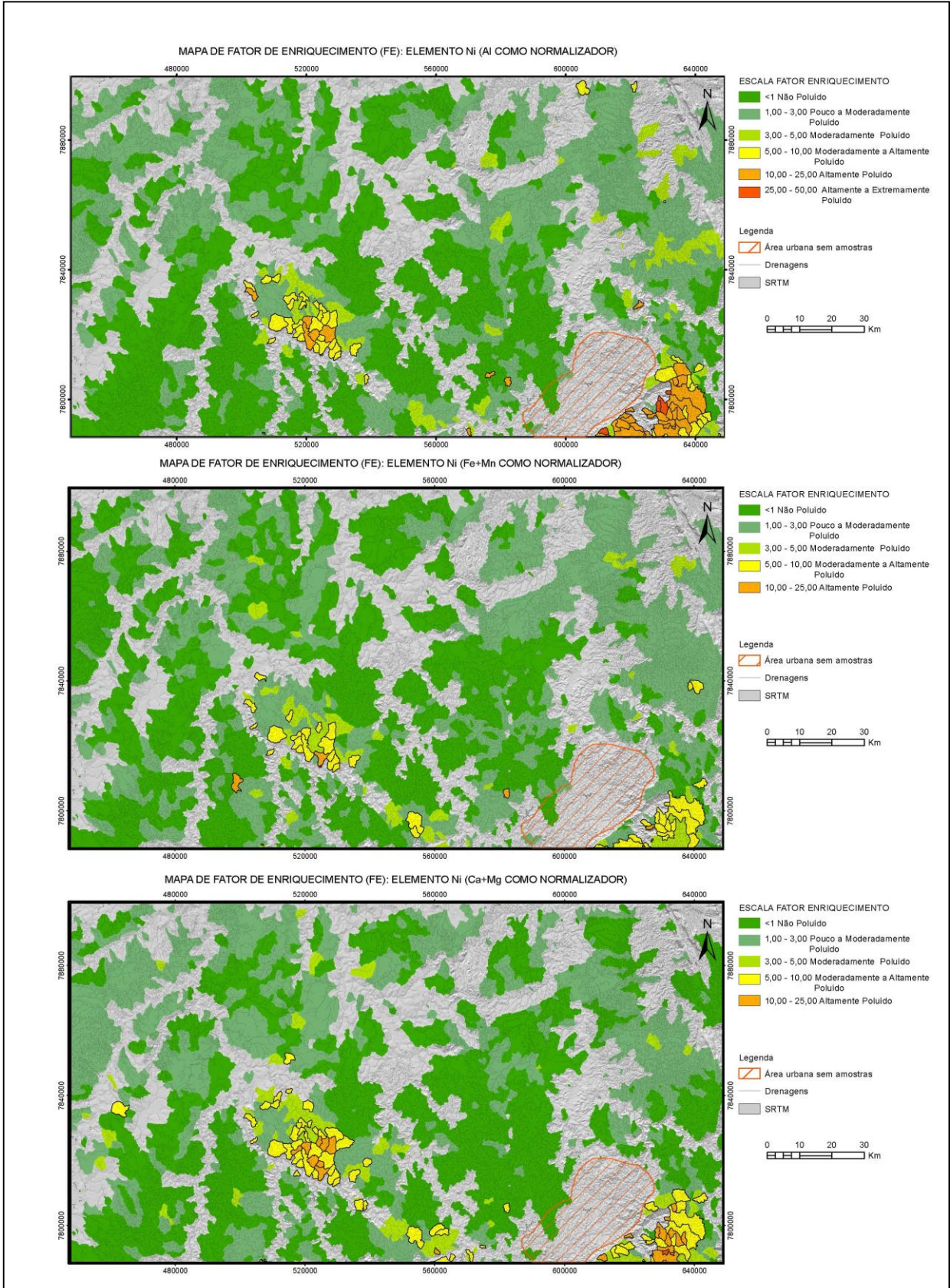


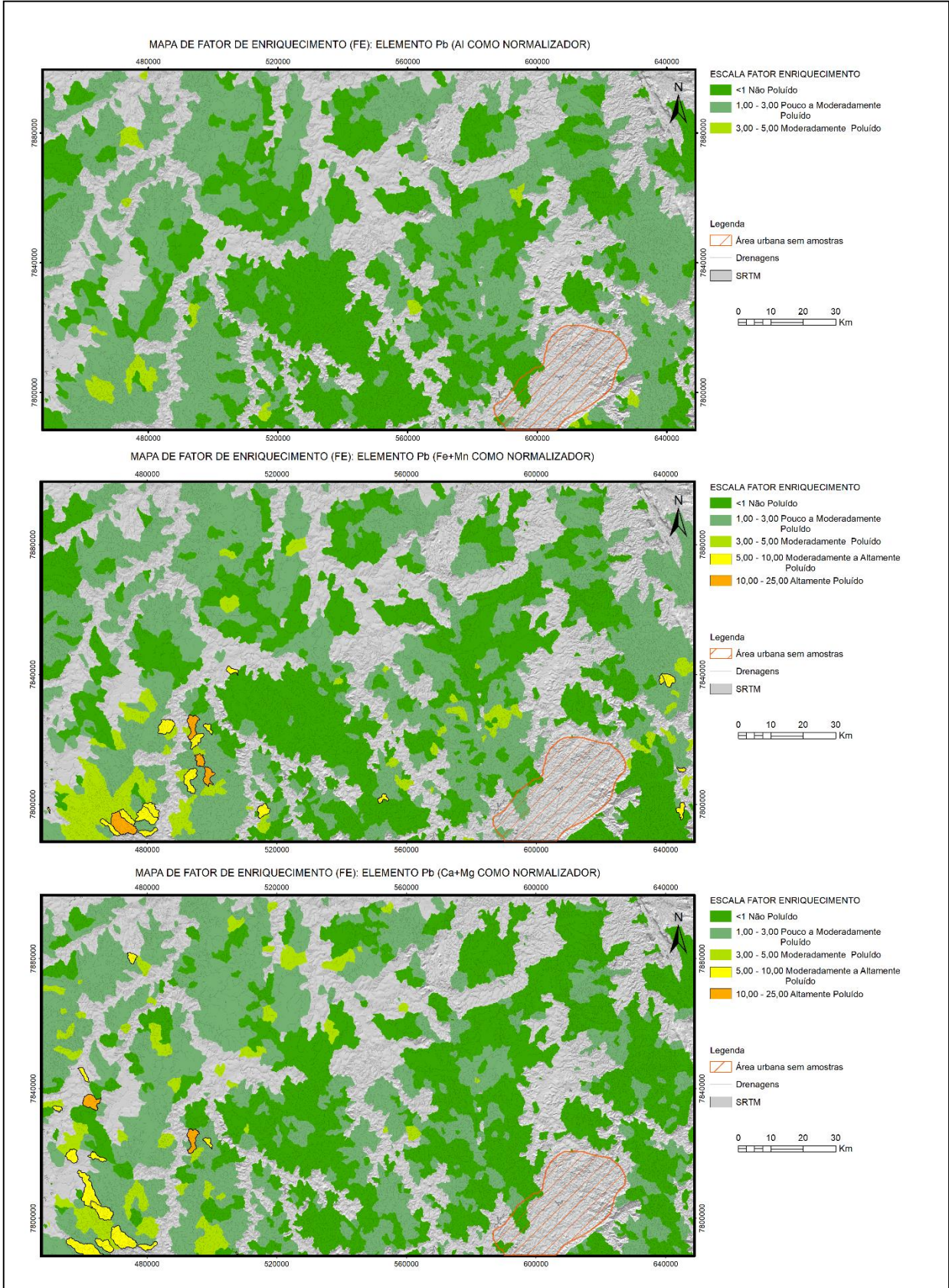


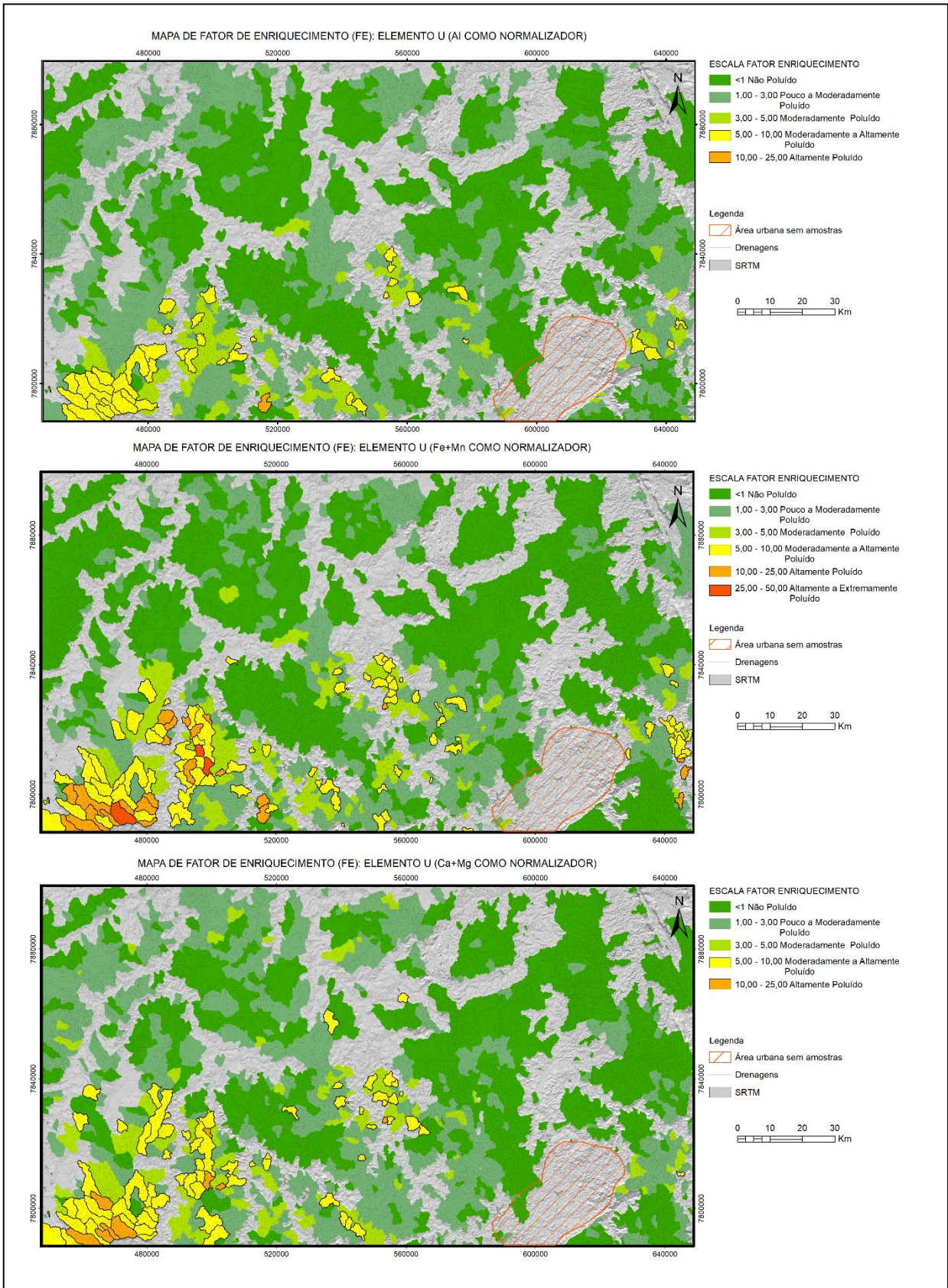


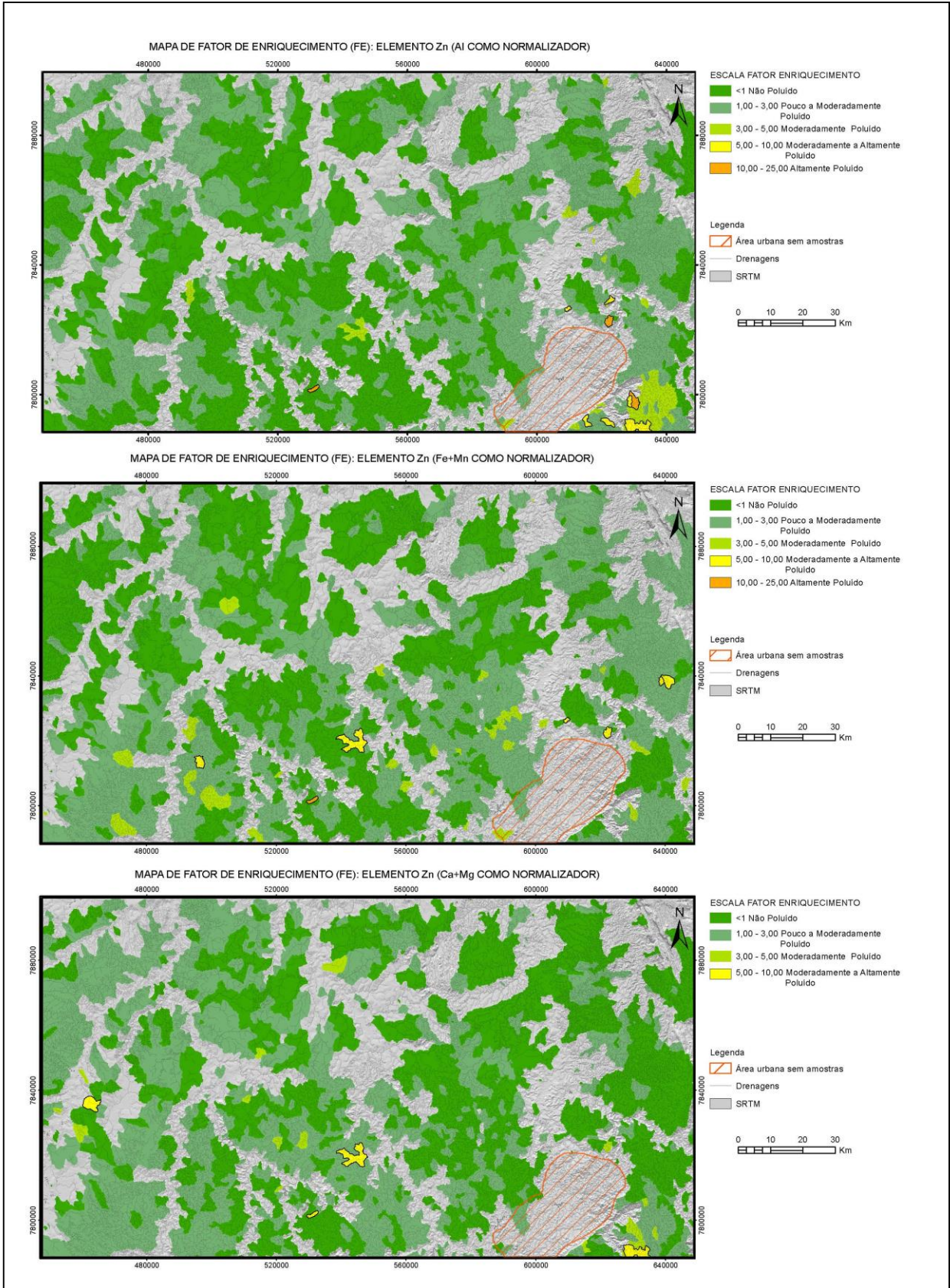












APÊNDICE

APÊNDICE A: Carta de Parceria.



Pelo presente Termo de Parceria, a empresa Serviço Geológico do Brasil – SGB/CPRM, situada na Avenida Brasil, 1731, na cidade de Belo Horizonte, CEP 30.140-002, CNPJ 00.091.652/0010-70, declara colaborar com o suporte necessário na execução do projeto de pesquisa, do (a) aluno (a) Sabrina Ferreira de Queiroz, no curso de Pós-graduação – Mestrado Profissional em Sustentabilidade e Tecnologia Ambiental, do IFMG/Bambuí, Bambuí (MG).

Outras informações:

Nome do projeto de pesquisa: ASSINATURA GEOQUÍMICA E SUAS IMPLICAÇÕES PARA O MEIO AMBIENTE: Bacia do rio São Francisco, região entre os municípios de Abaeté e Belo Horizonte.

Cidade na qual será realizada a execução do Projeto: Belo Horizonte.

Atividades da empresa/órgão: Pesquisa em Geologia e Recursos Minerais; Geologia Aplicada e Ordenamento Territorial; Hidrologia e Hidrogeologia.

Suporte da empresa na execução do projeto de pesquisa com a quantificação de recursos (marque as opções):

(X) infraestrutura disponível – valor estimado R\$ 5.000,00.

() quadro de funcionários – valor estimado R\$ xxxxx.

() recursos financeiros – valor estimado R\$ xxxxxxxx

(x) outros suportes (máquinas, equipamentos e suporte técnico na pesquisa) – valor estimado R\$ 15.000,00.

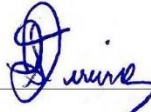
Totais de valores financeiros estimados ao projeto de pesquisa: R\$ 20.000,00

Obs. Os valores são somente uma estimativa, quantificando o apoio da empresa para a pesquisa.

Contrapartida do discente para a empresa referente ao desenvolvimento do projeto: Usar e disseminar o conhecimento adquirido no projeto na execução dos trabalhos internos melhorando a produtividade e qualidade dos produtos.

Valor estimado da contrapartida do(a) aluno(a) para a empresa: Por se tratar de uma empresa pública, neste projeto não gera um valor de lucro, mas gera conhecimento e desenvolvimento de soluções efetivas em Geociências para o bem-estar da sociedade brasileira.

Belo Horizonte (Minas Gerais), 25/04/2023.



Mestrando(a)

MARLON MARQUES

COUTINHO:0551737

1744

Representante da empresa – nome e assinatura

Assinatura de forma digital por MARLON MARQUES
COUTINHO:05517371744
DN: c=BR, o=ICP-Brasil, ou=Idoconferencia,
ou=25540404001013, ou=Secretaria da Receita Federal
do Brasil, postalCode=05517371744, ou=PPF e CPF, cn=
MARLON MARQUES COUTINHO:05517371744
Dados: 2023.04.26 09:29:07 -03'00'

APÊNDICE B: Produtos técnicos / tecnológicos: Atlas de *background* geoquímicos e Índices ambientais (Fator de Enriquecimento, Fator de Contaminação, Risco Ecológico, Índice de Poluição e Grau de Contaminação Modificado). Com anexo em tamanho A0 dos mapas de *background* geoquímicos e Índices ambientais.

Atlas de *Background* Geoquímico e Índices Ambientais

Valores de referência e índices ambientais
de elementos potencialmente tóxicos
à natureza e à vida da região de
Abaeté a Belo Horizonte -
Minas Gerais



2023



ATLAS DE *BACKGROUND* GEOQUÍMICO E ÍNDICES AMBIENTAIS

**VALORES DE REFERÊNCIA E ÍNDICES AMBIENTAIS
DE ELEMENTOS POTENCIALMENTE TÓXICOS À
NATUREZA E À VIDA DA REGIÃO DE ABAETÉ A
BELO HORIZONTE, MINAS GERAIS.**



BELO HORIZONTE
2023

FICHA TÉCNICA

2022. MESTRADO PROFISSIONAL EM SUSTENTABILIDADE E TECNOLOGIA AMBIENTAL (MPSTA) – Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG)

Não há direitos reservados. A reprodução está autorizada, no todo ou em parte, desde que a obra original seja devidamente referenciada.

INFORMAÇÕES E CONTATOS

IFMG/BAMBUÍ – Fazenda Varginha – Rodovia Bambuí/Medeiros – Km 05
Caixa Postal 05 – Bambuí – MG – 38900-000 – www.bambui.ifmg.edu.br

REITOR DO IFMG

Kléber Gonçalves Glória

PRÓ-REITOR DE PESQUISA, INOVAÇÃO E PÓS-GRADUAÇÃO

Fernando Gomes Braga

DIRETOR GERAL DO IFMG – BAMBUÍ

Rafael Bastos Teixeira

COORDENADOR DO MPSTA – BAMBUÍ

Gustavo Augusto Lacorte

AUTORES

Sabrina Ferreira de Queiroz

ORIENTADORA

Ariana Cristina Santos Almeida

COORIENTADOR

Eduardo Duarte Marques

PARCERIA

Serviço Geológico do Brasil - SGB/CPRM. Superintendência Regional de Belo Horizonte.

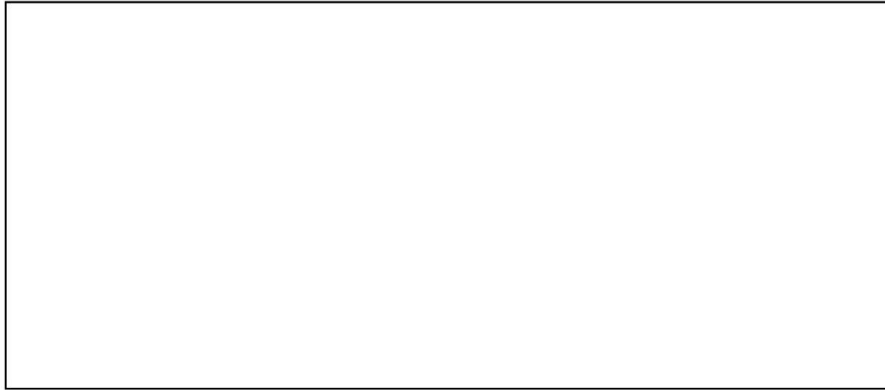
APOIO TÉCNICO

PROJETO GRÁFICO/EDITORAÇÃO

Capa – Elizabeth de Almeida Cadete Costa

Figuras – Sabrina Ferreira de Queiroz e Márcio Ferreira Augusto

FICHA CATALOGRÁFICA

A large, empty rectangular box with a thin black border, centered on the page. It is intended for a catalog card (FICHA CATALOGRÁFICA).

APRESENTAÇÃO

Produto tecnológico é um produto com elevado grau de novidade, fruto da aplicação de novos conhecimentos científicos, técnicas e expertises desenvolvidas no âmbito da pesquisa. É utilizado, diretamente, na solução de problemas, visando o bem-estar social (CAPES, 2019).

Mapas são produtos originados de estudos cartográficos e se enquadram no tipo de produto: Carta, Mapa ou similar, segundo a Capes (2019). Ademais, representam, de forma gráfica, uma superfície plana e visam trazer ao leitor as informações de objetos ou os fenômenos de origem física natural e/ou de origem antropogênica.

Obtidos a partir de um trabalho de levantamento geoquímico — realizado em projetos geoquímicos do **Serviço Geológico do Brasil (SGB/CPRM)**, e como resultado da Dissertação de Mestrado do **Instituto Federal de Educação, Ciência e Tecnologia de Minas Gerais (IFMG)**, intitulada como *Assinatura Geoquímica e suas Implicações para o Meio Ambiente: Bacia do Rio São Francisco, região entre os municípios de Abaeté e Belo Horizonte* — foram gerados os mapas e originou-se o presente Atlas, de forma a deixar mais claro e simples os resultados obtidos.

Os tratamentos robustos de estatística e de processamento espacial da informação deram origem a esses produtos, os quais têm como objetivo fornecer valores de referência para o controle e a mitigação de elementos químicos potencialmente tóxicos, bem como fornecer informações espaciais de índices ambientais em áreas que merecem devidas atenções em relação à disponibilidade destes elementos.

SUMÁRIO

INTRODUÇÃO	6
CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA.....	7
CONTEXTO GEOGRÁFICO	7
CONTEXTO GEOLÓGICO	9
MATERIAIS E MÉTODOS	12
DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE <i>BACKGROUND</i> GEOQUÍMICO	13
DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES AMBIENTAIS.....	14
PARÂMETROS LEGAIS E SUMÁRIOS ESTATÍSTICOS	15
MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO GEOQUÍMICA E ÍNDICES AMBIENTAIS.....	18
BACKGROUND GEOQUÍMICO – MÉTODO MAD.....	18
DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES AMBIENTAIS.....	25
Fator de Enriquecimento	25
Fator de Contaminação	46
Índice de Poluição	57
Grau de Contaminação Modificado	59
Risco Ecológico	61
DISCUSSÃO DOS RESULTADOS.....	63
CONCLUSÃO	65

INTRODUÇÃO

Levantamentos Geoquímicos Multielementares (LGM), aliados a técnicas avançadas de processamento de dados e análises estatísticas, constituem ferramentas importantes ao entendimento do meio físico e da sua relação com as alterações naturais e as geradas pelas ações antrópicas. Galuszka (2007a) cita a implicação destas alterações de forma importante nas áreas da Geologia, da Toxicologia, da Biologia e em outros campos, demonstrando a importância da definição de concentração geoquímica de elementos-traço e sua relevância para os estudos ambientais ligados à gestão territorial sustentável.

Sedimentos de corrente possuem uma grande capacidade de concentrar elementos-traço, e, desta forma, levantamentos geoquímicos por esta matriz podem revelar a assinatura geológica de uma região (GASPARON *et al.*, 2002; SILVA *et al.*, 2003), bem como serem aplicados em estudos ambientais, identificando potenciais fontes de contribuição, sejam elas de poluição antropogênica ou de fontes naturais (geogênicas), conforme apresentado por diversos trabalhos (ALBANESE *et al.*,

2007; DARNLEY *et al.*, 1995; GALUSZKA, 2007; REIMANN & CARITAT, 2005, 2017; YUAN *et al.*, 2013).

No Brasil, trabalhos de grande abrangência com esse enfoque são escassos. Existem levantamentos geoquímicos regionais, realizados por empresas estatais e instituições privadas (MARQUES, 2010; PINHO *et al.*, 2017; SALOMÃO *et al.*, 2018; LICHT, 2018), sendo necessários trabalhos e estudos que estabeleçam concentrações de elementos-traço e definam valores de referências que permitam a confrontação com as legislações, regulamentos e a avaliação do estado de integridade física e ambiental feita através do levantamento dos índices ambientais, permitindo o controle e a mitigação de elementos que podem levar a danos e riscos à saúde e à vida. A região de estudo se encontra na bacia hidrográfica do São Francisco, em Minas Gerais, região particularmente relevante para estudos geoquímicos, por estar inserida em uma das maiores províncias minerais do Brasil e do mundo. Abrange a área de maior concentração populacional e de importância econômica do estado, tendo como principais atividades

relacionadas: a indústria, a mineração e as atividades agropecuárias.

Por não se conhecer a distribuição dos elementos nesta região e qual a influência os grandes domínios geológicos exercem sobre ela, faz-se necessário: a identificação das associações e dos processos geoquímicos; a definição da distribuição espacial e concentrações de *background*; e a distribuição de valores anômalos a partir dos mapas de índices ambientais para os elementos analisados — levando em consideração as compartimentações geoquímicas e/ou geológicas, bem como a correlação com o uso e a ocupação do solo.

Dessa forma, o objetivo deste Atlas é apresentar os mapas de distribuição de elementos potencialmente tóxicos em diversos temas, com o intuito de enriquecer o conhecimento geoquímico, e trazer informações coerentes com a realidade regional, possibilitando o controle e a mitigação destes elementos na área.

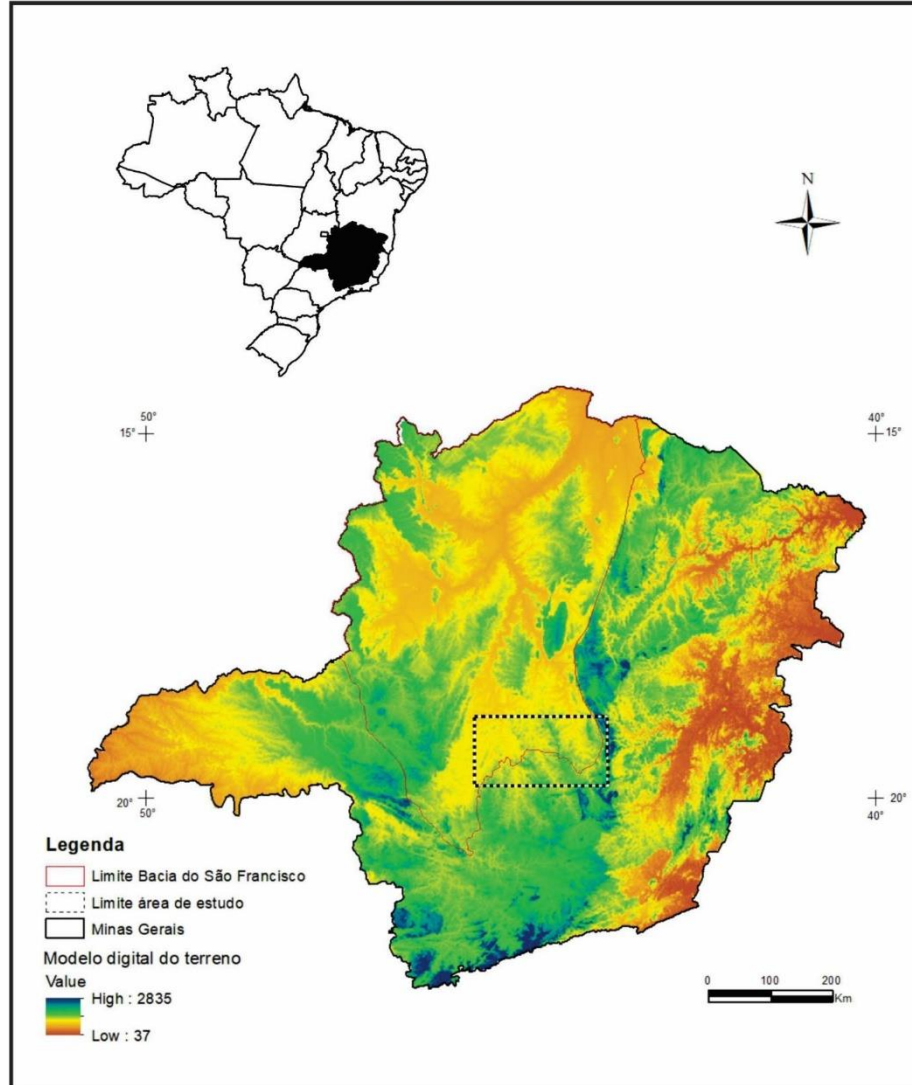
▶ CARACTERIZAÇÃO DA ÁREA

CONTEXTO GEOGRÁFICO

A área abordada neste Atlas está localizada no Estado de Minas Gerais, Região Sudeste do Brasil, e no extremo sudeste da Bacia do São Francisco, com área aproximada de 22 mil km² (**Figura 1**). Abrange vários municípios, como a capital mineira, **Belo Horizonte**, e as seguintes localidades: Abaeté, Pompéu, **Sete Lagoas**, Baldim, Bom Despacho, Pará de Minas, Inhaúma, Pedro Leopoldo, **Betim**, **Contagem**, Lagoa Santa e outras; sendo que alguns destes municípios compõem a lista dos 20 municípios de maior PIB do estado em 2017 (FJP, 2019).

Grande parte da área de estudo está inserida na Região Geográfica Intermediária (RGINT) de Belo Horizonte, e parte pertence à RGINT de Divinópolis, sendo a RGINT de Belo Horizonte responsável por uma grande participação na produção industrial do estado (FJP, 2019).

Figura 1: Localização geográfica da área de estudo e da Bacia do São Francisco.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

CONTEXTO GEOLÓGICO

A área de estudo se encontra na porção sul-sudeste do Cráton do São Francisco, sendo limitada a leste pela Faixa Araçuai (ALMEIDA, 1977; UHLEIN *et al.*, 1990; UHLEIN, 1991; PEDROSA SOARES *et al.*, 1992), conforme mostra a **Figura 3**. Segundo Alkmim (2004), o Cráton do São Francisco é uma entidade geotectônica que foi consolidada ao final da orogênese brasileira.

A geologia regional é definida, principalmente, por cinco grandes unidades litoestratigráficas, que são caracterizadas, da base para o topo, pelos: Complexos Metamórficos; Supergrupo Rio das Velhas; Supergrupo Minas; Supergrupo Espinhaço; e Grupo Bambuí.

As rochas do Grupo Bambuí foram depositadas sobre rochas arqueanas pertencentes aos complexos Belo Horizonte (RIBEIRO *et al.*, 2003) e Divinópolis (ROMANO, 2007); sobre os metassedimentos do Supergrupo Espinhaço de idade paleo-mesoproterozóica, unidades não envolvidas na deformação Brasileira (PFLUG, 1965, 1968; PFLUG & RENGER, 1973); e sobre o Grupo Macaúbas (PFLUG, 1965, 1968; PFLUG

& RENGER, 1973), de idade neoproterozóica. Segundo Almeida (1977), durante o evento Brasileiro ocorreu a inversão parcial da Bacia Espinhaço: cavalgando sobre as rochas dos grupos Macaúbas e Bambuí.

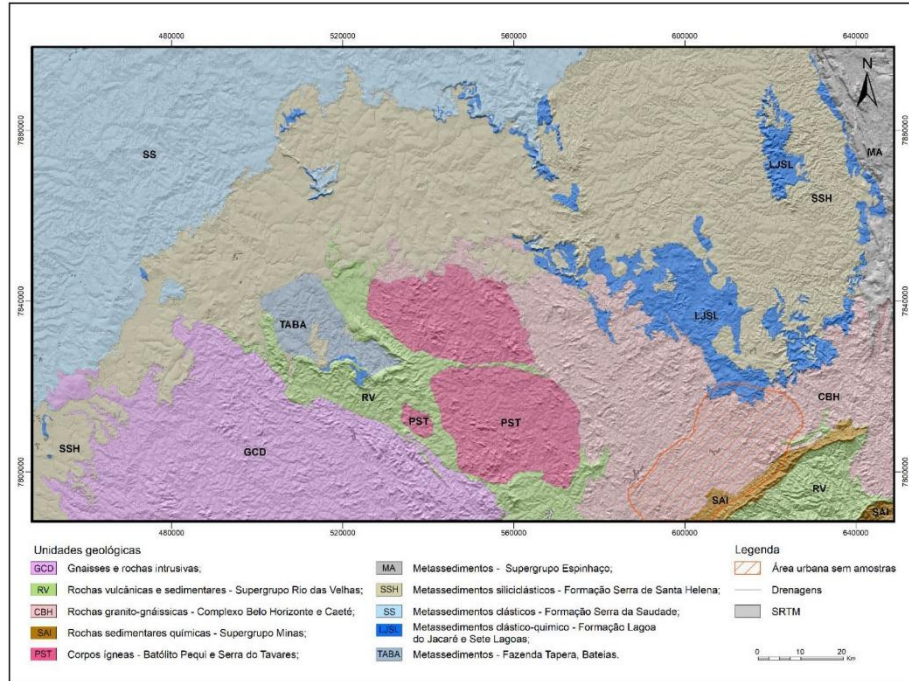
Na região do contato faixa Araçuai – Cráton, a deformação brasileira foi melhor impressa com a presença de falhamentos e dobramentos, mas em atingir o embasamento granito-gnáissico dos complexos metamórficos, caracterizando uma tectônica superficial (*thin skinned*) (ALKMIM *et al.*, 1993; PINHO *et al.*, 2006, 2008). À oeste, unidades estratigráficas apresentam uma menor deformação, mantendo as características sedimentares melhor preservadas, principalmente a partir da Falha de Sete Lagoas, indicando que o evento colisional brasileiro teve influência apenas secundária na estruturação do Grupo Bambuí na região central da bacia (MARSHAK & ALKMIM, 1989).

A borda sudeste da Bacia do São Francisco, onde as relações estratigráficas entre o embasamento cristalino e as rochas sedimentares que o recobrem estão bem definidas, montam uma história evolutiva da sedimentação, permitindo subsidiar a prospecção de

jazidas de vários bens minerais metálicos, tais como Zn, Pb, fluorita, etc.; e não-metálicos, como calcário e dolomito utilizados para os mais diversos fins (MARQUES, 2010).

A **Figura 2** apresenta o Mapa Geológico Simplificado da Área de Estudo, ressaltando as principais associações litológicas.

Figura 2: Mapa geológico simplificado da área de estudo.



Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

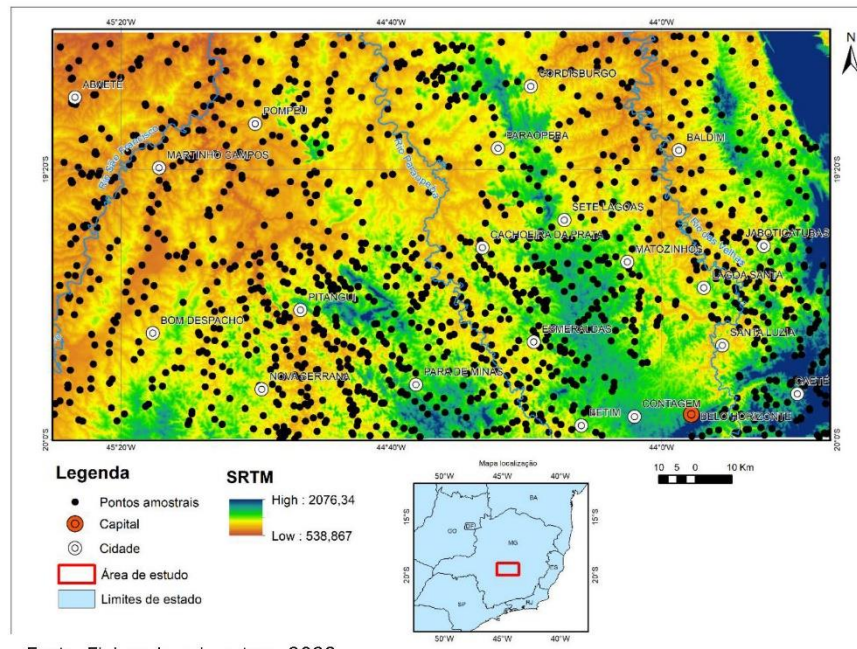
MATERIAIS E MÉTODOS

Neste Atlas foram utilizados os dados resultantes de projetos executados pelo Serviço Geológico do Brasil-SGB/CPRM, no período de 2008 a 2013, que abordam o Quadrilátero Ferrífero e região, sendo selecionados os dados para a área de estudo. É composto por 1.322 amostras de sedimentos de corrente (fração < 80 mesh e digestão por água régia) já coletadas e analisadas para 53 elementos (Ag, Al, As, Au, B, Ba, Be, Bi, Ca, Cd, Ce, Co, Cr, Cs, Cu, Fe, Ga, Ge, Hf, Hg, In, K, La, Li, Mg, Mn, Mo, Na, Nb, Ni, P, Pb, Pd, Pt, Rb, Re, S, Sb, Sc,

Se, Sn, Sr, Ta, Te, Th, Ti, Tl, U, V, W, Y, Zn e Zr), via Espectrometria de Emissão Atômica por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-OES) e Espectrometria de Massa por Plasma Acoplado Indutivamente (ICP-MS). (Figura 3).

As coletas destes dados seguiram procedimentos de coleta, preparação e análise, aceitos internacionalmente, e com um controle de QA/QC em todas as etapas. Os pontos amostrados foram, através da delimitação de microbacias, de 1ª a 3ª ordem.

Figura 3: Distribuição amostral dos sedimentos de corrente.



O processamento dos dados geoquímicos ocorreu com técnicas conceituadas indicadas e aplicadas por vários autores (CARITAT *et al.*, 2001; CARITAT & COOPER, 2016; REIMANN & CARITAT, 2017; REIMANN *et al.*, 2008, 2018), bem como análises estatísticas com utilização de técnicas uni, bi e multivariadas.

Dentro da população amostral dos 53 elementos, foram selecionados 21 considerados potencialmente tóxicos para a realização de tratamento estatístico convencional e descritivo, bem como à determinação de diversos parâmetros, como: amplitude, médias, desvio padrão, desvio absoluto da mediana, mediana, coeficiente de variação, teste de normalidade de Shapiro-Wilk e Kolmogorov-Smirnov, entre outros.

Boxplots, histogramas, gráficos de probabilidade, gráficos de dispersão e estatísticas bivariadas, permitem o estabelecimento de tendências e associações dos elementos analisados, bem como a compreensão dos processos geológicos, físicos e antropogênicos que controlam os resultados geoquímicos (MANLY, 1986; DAVIS, 1986; TABACHNICK & FIDELL, 2001; REIMANN *et al.*, 2002; REIMANN *et al.*, 2008; FILZMOSER *et al.*, 2009;

CARRANZA, 2009, 2011; GRUNSKY, 2010; LAPWORTH *et al.*, 2012).

DETERMINAÇÃO DOS VALORES DE *BACKGROUND* GEOQUÍMICO

A definição de *background* geoquímico ocorreu através do método estatístico (método indireto) que utiliza de técnicas e de ferramentas gráficas, computacionais e testes estatísticos probabilísticos, de forma a apresentar a distribuição dos resultados das análises químicas.

Essas técnicas estatísticas permitem, em diversos níveis: organizar um conjunto de dados; identificar seu comportamento e sua estruturação; caracterizar padrões; definir estimadores; definir faixas de concentração de *background* e de anomalias; definir a presença de subpopulações; definir as relações entre as variáveis (elementos); definir a distribuição e o comportamento destas variáveis no espaço (VICQ, 2015; SALOMÃO, 2020).

Atualmente, uma gama de métodos são utilizados na literatura, tais como Média \pm 2 Desvios-Padrão (em desuso); Percentis 95th e 98th; Técnica de 2σ

iterativo (12σ); Função de Distribuição Calculada (CDF); MAD (*Median Absolute Deviation*); TIF (*Tukey's Inner Fence*); e, recentemente, o modelo fractal (REIMANN *et al.*, 2018a; REIMANN & CARITAT, 2005, 2017; SAHOO *et al.*, 2020b; SALOMÃO *et al.*, 2018, 2019a; CHENG *et al.*, 1995, 1999, 2000).

Dentre os métodos citados, neste trabalho serão realizados três deles (devido à robustez mostrada em trabalhos prévios), a saber: o desvio absoluto da mediana (MAD); o TIF, amplamente conhecido através do gráfico boxplot; e, por fim, o modelo fractal. Neste Atlas serão apresentados os resultados obtidos através da técnica MAD.

DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES AMBIENTAIS

Os índices ambientais permitem quantificar o enriquecimento e o empobrecimento desses elementos em diversas matrizes geológicas, principalmente sedimentos e solos. Para isso, é necessário compará-los com os valores de referência (SIVAKUMAR *et al.*, 2016).

Segundo Soares (2002), os sedimentos contaminados são considerados mundialmente como os

contaminantes que mais contribuem para a degradação dos ecossistemas aquáticos, e, portanto, um problema eminente a ser resolvido para a preservação dos recursos hídricos.

Os sedimentos têm a capacidade de acumular elementos químicos em sua estrutura através dos diversos mecanismos, tais como adsorção, precipitação, entre outros, tornando-se uma ótima matriz para registro de processos que ocorrem em uma bacia de drenagem, sejam por processos naturais ou de origem antrópica.

Para a definição dos índices ambientais, é necessário a utilização de valores de referência, que devem ser considerados livres da influência antrópica, sendo utilizada com frequência a média crustal (UCC).

Contudo, devido à grande variação de concentrações ocasionadas pela grande variabilidade dos substratos geológicos (litotipos) e de diferentes atividades antropogênicas, o uso dessa referência pode subestimar ou superestimar os cálculos e não fornecer um resultado coerente com a realidade. Dessa forma, o uso do valor de referência (*background*) da própria área gera resultados fidedignos.

Apresentaremos diversos modos para calcular esses índices de contaminação, tais como: Fator de

Enriquecimento (FE); Fator de tratamento dos dados geoquímicos Contaminação (FC); Índice de Poluição considerando toda a área de estudo, e, em (PLI); Grau de Contaminação Modificado uma segunda etapa, os resultados dos (GCm); e Risco Ecológico (RE). tratamentos dos dados geoquímicos

Para as diversas técnicas e individualizados por compartimento tratamentos descritos, será apresentado o geológico.

▶ PARÂMETROS LEGAIS E SUMÁRIOS ESTATÍSTICOS

Tabela 1: Valores orientadores para solos e água subterrânea (COPAM – CERH N.º 166/2011), confrontados com níveis de classificação do material a ser dragado e dispostos em águas sob jurisdição nacional (CONAMA N.º 454/2012).

Substâncias (Inorgânicos)	COPAM – CERH N.º 166/2011						CONAMA N.º 454/2012					
	Valor de						Substâncias (Metais e Semi metais (mg.kg ⁻¹))	NÍVEIS DE CLASSIFICAÇÃO DO MATERIAL A SER DRAGADO (em unidade de material seco)				
	Referência de qualidade	Prevenção (1)	Solo (mg.kg ⁻¹ de peso seco) (2)			Água Subterrânea (µg.L ⁻¹) (1)		Água doce		Água salina/ salobra		
			Investigação (1)					Investigação	Nível 1	Nível 2	Nível 1	Nível 2
			Agrícola	Residencial	Industrial							
Alumínio (5)	-	-	-	-	-	3500	-	-	-	-	-	-
Antimônio (4)	0,5	2	5	10	25	5	-	-	-	-	-	-
Arsênio (4)	8	15	35	55	150	10	Arsênio (As)	5,9 ¹	17 ¹	4	70 ²	
Bário (4)	93	150	300	500	750	700	-	-	-	-	-	-
Boro	11,5	-	-	-	-	500	-	-	-	-	-	-
Cádmio (4)	<0,4	1,3	3	8	20	5	Cádmio (Cd)	0,6 ¹	3,5 ¹	1,2 ²	4	7,2
Chumbo (4)	19,5	72	180	300	900	10	Chumbo (Pb)	35 ¹	91,3 ¹	46,7 ²	218 ²	
Cobalto	6	25	35	65	90	5	-	-	-	-	-	-
Cobre (4)	49	60	200	400	600	2.000	Cobre (Cu)	35,7 ¹	197 ¹	34 ²	270 ²	
Cromo (2)	75	75	150	300	400	50	Cromo (Cr)	37,3 ¹	90 ¹	81 ²	370 ²	
Ferro (5)	-	-	-	-	-	2450	-	-	-	-	-	-
Manganês (5)	-	-	-	-	-	400	-	-	-	-	-	-
Mercurio (4)	0,05	0,5	12	36	70	1	Mercurio (Hg)	0,17 ¹	0,486 ¹	4	5	0,3
Molibdênio	<0,9	30	50	100	120	70	-	-	-	-	-	1,0
Níquel	21,5	30	70	100	130	20	Níquel (Ni)	1	1	20,9 ²	51,6 ²	18
								18	35,9			

Nitrato (como N) ⁽¹⁾	-	-	-	-	-	10.000	-	-	-	-	-
Prata	<0,45	2	25	50	100	50	-	-	-	-	-
Selênio ⁽⁴⁾	0,5	5	-	-	-	10	-	-	-	-	-
Vanádio	129	-	-	-	-	-	-	-	-	-	-
Zinco ⁽⁵⁾	46,5	300	450	1000	2000	1050	Zinco (Zn)	123 ¹	315 ¹	150 ²	410 ²

Fonte: Tabela modificada com base em CONAMA, 2012. Disponível em:

<http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=667>. Acesso em: 5 jun. 2022. E em COPAM, 2011. Disponível em:

<<http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414>>. Acesso em: 05 jun. 2022.

Para a tabela de dados, COPAM/CERH N.º 02/2010:

(1) Os Valores de Prevenção e Investigação são os estabelecidos na Deliberação Normativa Conjunta COPAM/CERH N.º 02, de 08 de setembro de 2010;

(2) Em função da concentração de cromo obtida, após análise estatística, ser superior ao VP estabelecido pela Resolução CONAMA 420/2009, adotou-se para o VRQ o valor de VP dessa Resolução;

(3) Procedimentos analíticos para digestão ácida de amostras de solos para determinação de espécies metálicas por técnicas espectrométricas devem seguir as recomendações dos métodos 3050b (exceto para o elemento mercúrio) ou 3051 da U.S EPA - SW-846 ou outro procedimento equivalente;

(4) Valores máximos permitidos oriundos da Portaria N.º 518/2004, do MS (Tabela N.º 3), com base em risco à saúde humana;

(5) Estes valores são diferentes da Tabela N.º 5, da Portaria N.º 518 do MS, pois foram calculados com base em risco à saúde humana, de acordo com o escopo desta resolução.

Para a tabela de dados, CONAMA N.º 454/2012:

Os valores orientadores adotados na Tabela III têm como referência as seguintes publicações oficiais canadenses, norte-americanas e europeias:

(1) *Environmental Canada. Canadian Sediment Quality Guidelines for the Protection of Aquatic Life. Canadian Environmental Quality Guidelines - Summary Tables*. Atualizado em 2002;

(2) Long, E. R., MacDonald, D. D., Smith, S. L. & Calder F. D. (1995). Incidence of adverse biological effects within ranges of chemical concentrations in marine and estuarine sediments. *Environmental Management* 19 (1): 81-97.

Tabela 2: Sumário estatístico dos elementos e média crustal (UCC).

Sumário Estatístico Geral — Dados Brutos									
Variáveis	Média	Mínimo	Q1 (25%)	Q2 (Mediana)	Q3 (75%)	Máximo	Assimetria	Curtose	UCC
Ag (ppb)	23,72	4,00	16,00	22,00	30,00	662,00	1,47	4,52	53
Al (%)	1,56	0,13	1,10	1,62	2,31	8,00	-0,54	0,82	8,15

As (ppm)	3,05	0,05	1,10	3,60	7,10	1665,00	-0,05	0,95	4,48
Au (ppb)	0,56	0,10	0,20	0,50	1,10	10097,40	1,55	4,52	0,0015
B (ppm)	3,94	0,50	1,00	10,00	10,00	24,00	-0,32	-1,64	17
Ba (ppm)	63,72	8,90	44,00	60,25	90,10	821,90	0,32	0,80	624
Bc (ppm)	0,48	0,05	0,40	0,50	0,70	11,00	-0,59	2,02	2,1
Bi (ppm)	0,20	0,01	0,13	0,24	0,33	4,21	-0,67	1,13	0,16
Ca (%)	0,06	0,01	0,04	0,06	0,11	9,54	0,56	1,69	2,56
Cd (ppm)	0,03	0,01	0,02	0,03	0,04	0,81	0,34	0,53	0,09
Ce (ppm)	61,38	6,70	44,20	65,00	85,00	762,60	-0,04	1,96	63
Co (ppm)	7,58	0,20	4,10	7,50	13,20	321,70	0,17	0,66	17,3
Cr (ppm)	29,63	1,00	16,20	30,75	53,30	4808,70	0,11	0,69	92
Cs (ppm)	1,13	0,08	0,77	1,16	1,74	8,97	-0,40	0,84	4,9
Cu (ppm)	15,04	1,01	9,08	16,91	25,02	424,00	-0,36	0,44	28
Fe (%)	2,99	0,16	2,08	3,19	4,48	31,61	-0,38	1,29	3,52
Ga (ppm)	6,44	0,50	4,60	6,80	9,40	30,80	-0,75	1,44	17,5
Ge (ppm)	0,07	0,05	0,05	0,05	0,10	0,40	0,57	-0,42	1,4
Hf (ppm)	0,14	0,01	0,09	0,14	0,23	2,05	-0,10	0,54	5,3
Hg (ppb)	18,93	0,25	13,00	21,00	30,00	2136,00	-1,10	6,20	50*
In (ppm)	0,03	0,01	0,02	0,03	0,04	0,24	0,10	-0,31	0,056
K (%)	0,08	0,01	0,06	0,08	0,12	0,69	-0,07	0,35	2,32
La (ppm)	23,94	3,20	16,40	24,20	34,20	376,80	0,26	1,24	31
Li (ppm)	5,99	0,30	4,40	6,30	8,70	44,40	-0,64	1,68	21
Mg (%)	0,05	0,01	0,03	0,05	0,07	0,65	0,25	0,93	1,49
Mn (ppm)	380,13	16,00	193,00	344,50	686,00	7841,00	0,43	0,29	774
Mo (ppm)	0,42	0,04	0,24	0,35	0,56	10,22	1,37	2,04	1,1
Na (%)	0,00	0,00	0,00	0,00	0,01	0,07	0,42	0,28	0,05
Nb (ppm)	0,24	0,02	0,15	0,23	0,37	2,80	0,25	0,22	12
Ni (ppm)	10,11	0,50	5,60	9,70	16,20	387,70	0,47	0,75	47
P (%)	0,03	0,00	0,02	0,03	0,04	0,41	0,00	1,75	0,067*
Pb (ppm)	16,46	1,77	12,62	17,06	21,92	215,33	-0,35	2,26	17
Pd (ppb)	8,45	5,00	5,00	5,00	10,00	245,00	1,56	2,08	0,52
Pt (ppb)	1,53	1,00	1,00	1,00	2,00	25,00	1,37	1,44	0,5
Rb (ppm)	11,42	1,30	8,90	12,50	16,40	52,40	-1,05	1,76	84
Re (ppb)	0,65	0,50	0,50	0,50	1,00	4,00	1,05	0,26	0,198
S (%)	0,02	0,01	0,01	0,02	0,02	3,08	0,85	3,28	0,0621*
Sb (ppm)	0,23	0,01	0,06	0,36	0,61	26,12	0,03	-0,31	0,4
Sc (ppm)	3,40	0,20	2,30	3,50	5,20	26,00	-0,48	1,25	14
Se (ppm)	0,16	0,05	0,10	0,20	0,30	20,40	0,27	0,94	0,09
Sn (ppm)	1,04	0,10	0,70	1,00	1,60	11,30	-0,07	0,46	2,1
Sr (ppm)	7,49	0,80	4,80	7,30	10,90	506,10	0,87	2,84	320
Ta (ppm)	0,03	0,03	0,03	0,03	0,03	0,05	1,26	-0,40	0,9
Te (ppm)	0,02	0,01	0,01	0,02	0,03	0,18	0,70	-0,34	0,001
Th (ppm)	8,70	0,60	5,70	7,70	13,10	190,80	0,58	1,36	10,5
Ti (%)	0,01	0,00	0,01	0,01	0,02	0,19	0,47	-0,14	0,38
Tl (ppm)	0,16	0,02	0,11	0,16	0,23	1,12	-0,19	0,70	0,9
U (ppm)	1,60	0,10	1,10	1,50	2,40	15,90	0,20	1,13	2,7
V (ppm)	32,16	1,00	21,00	34,00	52,00	245,00	-0,68	1,35	97
W (ppm)	0,07	0,00	0,05	0,05	0,10	14,80	3,23	22,64	1,9
Y (ppm)	7,97	0,61	5,48	8,50	12,49	58,80	-0,66	1,01	21
Zn (ppm)	27,88	1,30	20,20	28,80	39,20	588,50	-0,28	3,17	67
Zr (ppm)	6,88	0,30	4,40	6,80	11,00	78,80	-0,29	1,21	193

Fonte: Elaborado pela autora, 2023.

▶ **MAPAS DE DISTRIBUIÇÃO
GEOQUÍMICA E ÍNDICES
AMBIENTAIS**

**BACKGROUND GEOQUÍMICO – MÉTODO
MAD**

O cálculo dos valores de *background* do MAD (1) é obtido através do desvio absoluto da mediana, calculado através do produto com uma constante (1,4826), tendo como resultado uma estimativa consistente do desvio padrão (REIMANN *et al.*, 2018). Portanto, a faixa de *background* define-se pela mediana $\pm 2 \cdot \text{MAD}$.

Essa técnica é bastante utilizada por ser robusta, minimizando os efeitos de *outliers*:

Onde: K é uma constante para ajuste a uma

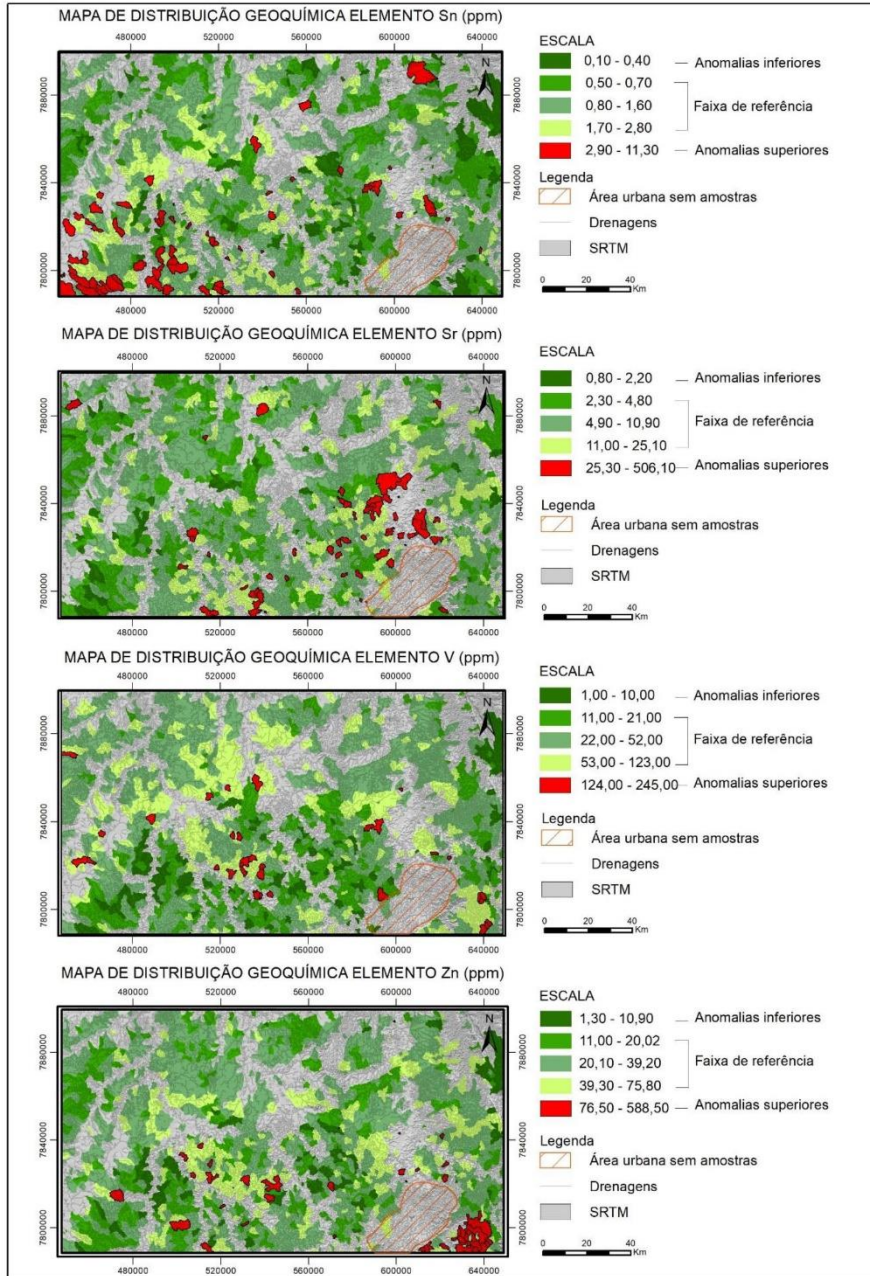
$$(1) \text{MAD}(y) = K \cdot \text{mediana}_i |y_i - \text{mediana}_i(y_i)| \cdot$$

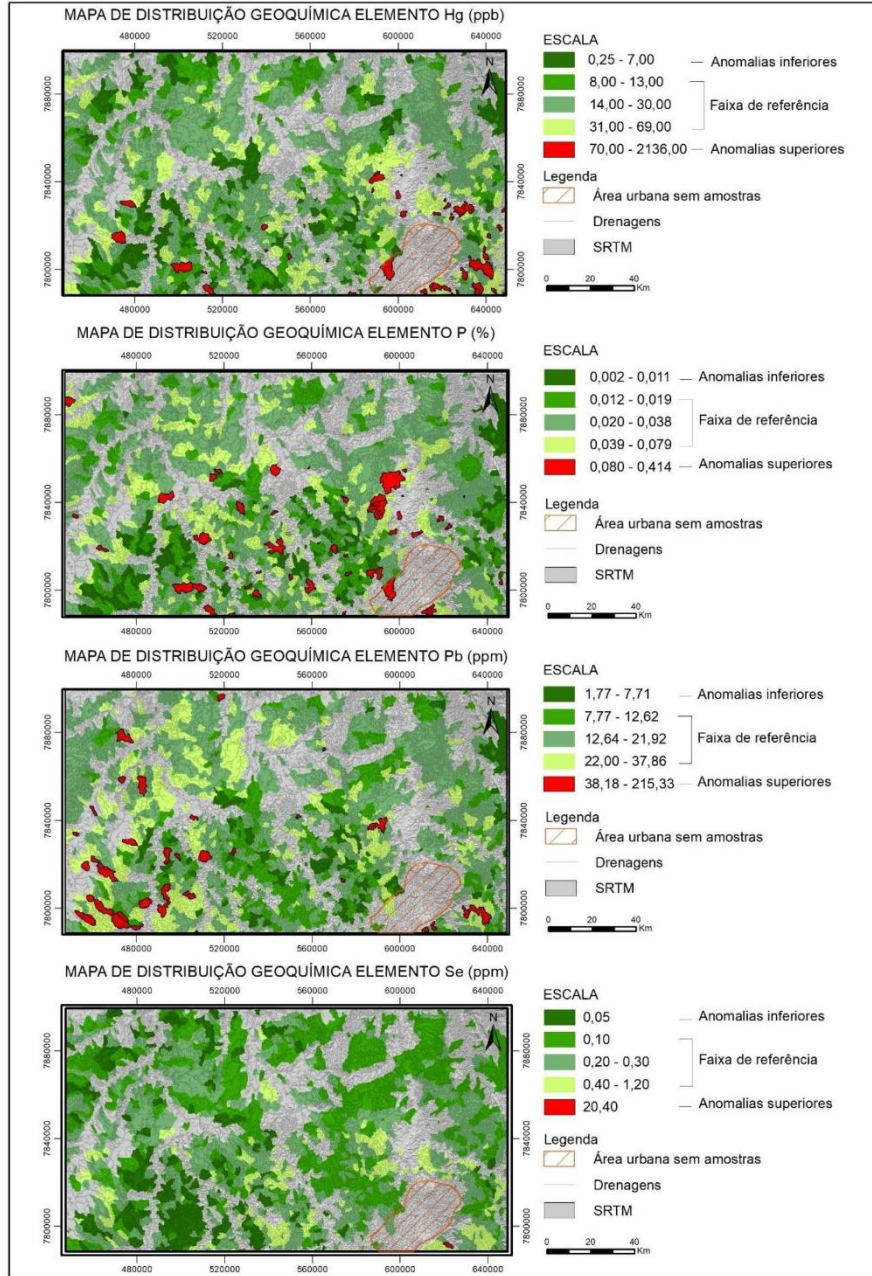
$$(2) \text{A_MAD} = 10 (\text{mediana}(y) \pm 2 \cdot [\text{MAD}y])$$

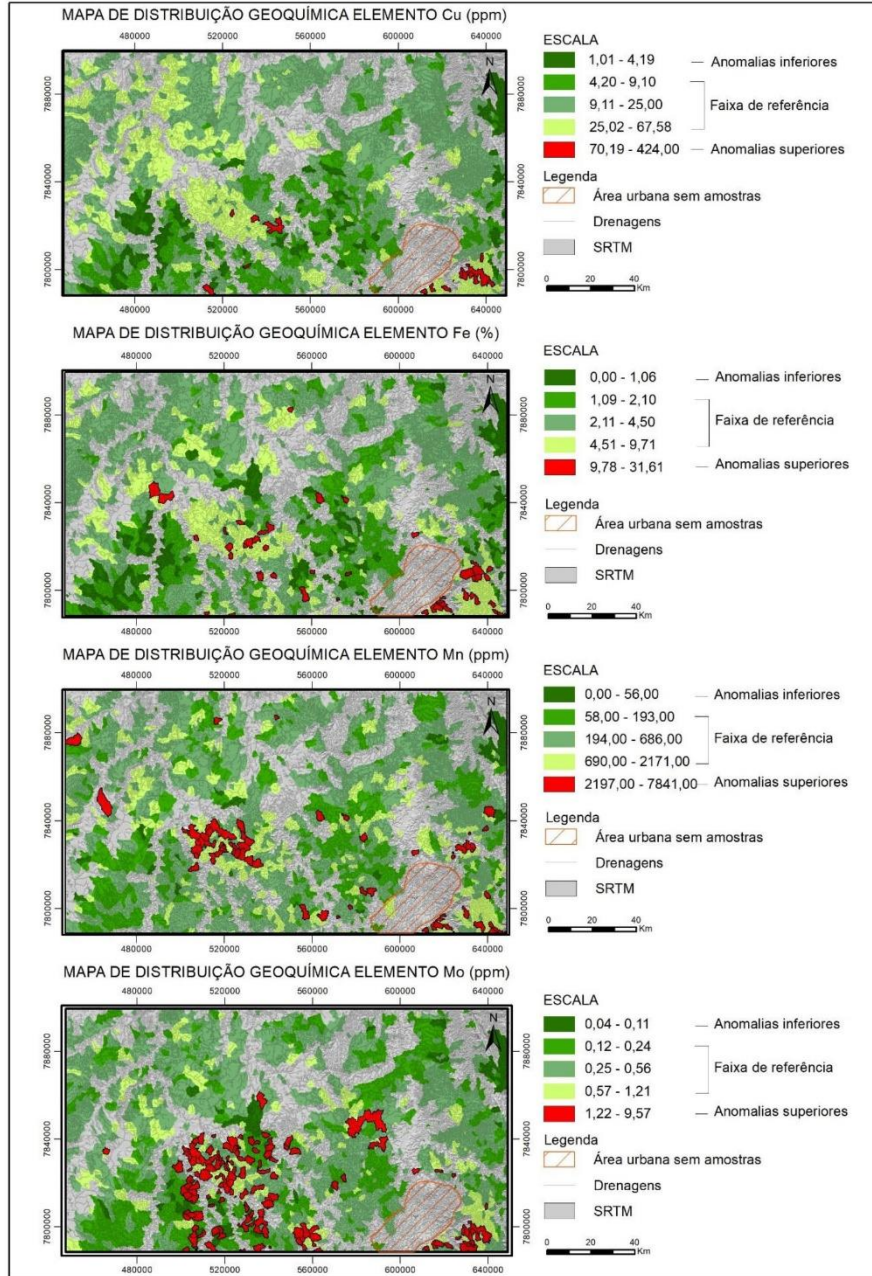
distribuição normal (K = 1,4826).

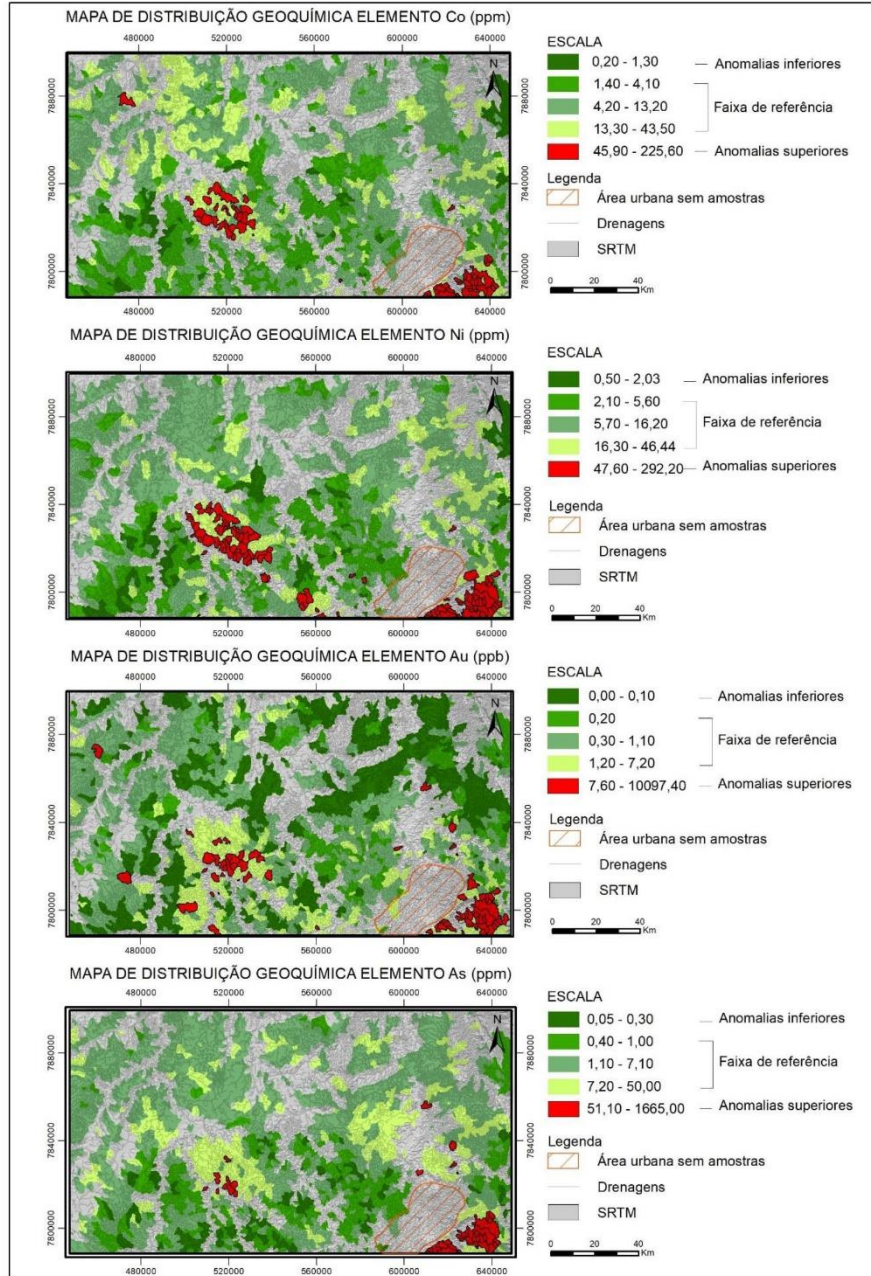
A_MAD é o anti-log ou o algoritmo inverso da transformação aplicada.

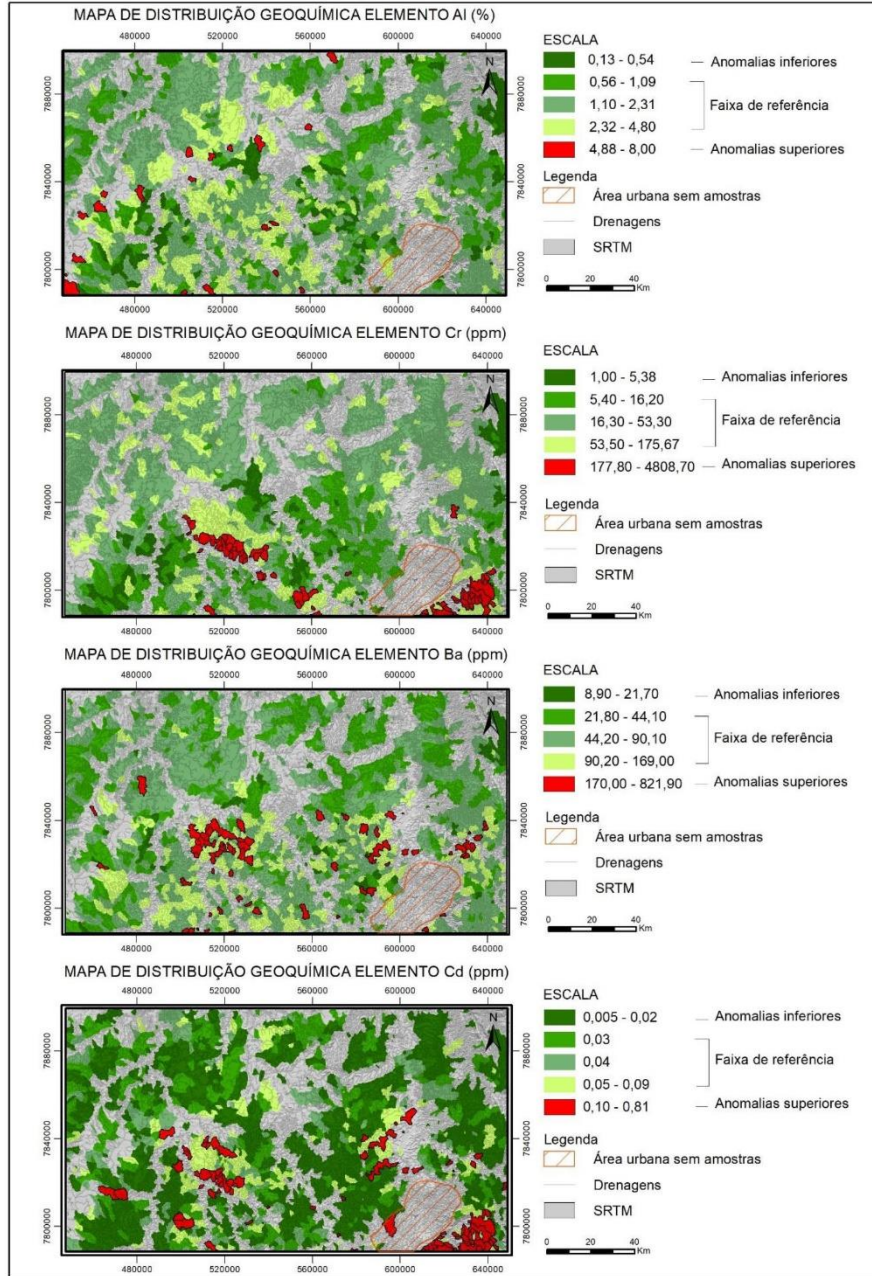
Mapas de *Background* Geoquímico – Método Mad para os elementos Al, Au, As, Ba, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Hg, Mn, Mo, Ni, P, Pb, Se, Sn, Sr, U, V e Zn.

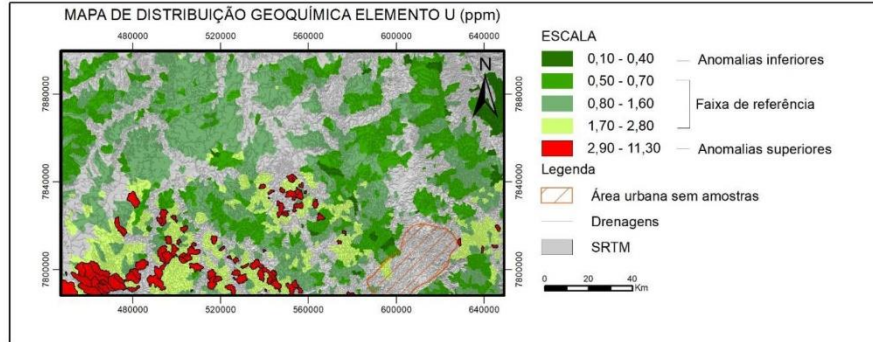












DETERMINAÇÃO DOS ÍNDICES AMBIENTAIS

As técnicas para determinação dos índices ambientais foram executadas através do tratamento dos dados totais da área e, em uma segunda etapa, após individualização dos dados por unidade geológica. Os resultados obtidos a partir destes tratamentos serão apresentados a seguir:

Fator de Enriquecimento

O Fator de Enriquecimento (FE), como indicado pelo nome, indica o enriquecimento de determinado metal na amostra, seja de origem natural ou não, podendo ser calculado com diferentes normalizadores: Al, representando argilominerais, é considerado um elemento conservativo; (Fe + Mn) representando os hidróxidos de Fe e Mn; e (Ca + Mg) representando os carbonatos. Esses elementos são utilizados por serem abundantes na crosta, sendo os principais agentes de adsorção na natureza, e, por terem afinidade com elementos-traço, o comportamento destes elementos é altamente influenciado por eles (LIN &

CHEN, 1998; LATRILLE *et al.*, 2001; SILVA-FILHO *et al.*, 2014).

$$FE = (C_x/C_R)_S / (C_x/C_R)_{VR \text{ área}}$$

Onde: C_x é a concentração do metal escolhido; C_R é a concentração do elemento normalizador; S representa que o cálculo do elemento escolhido é realizado para cada amostra; e VR área significa que é referente aos valores de referência (*background*) do elemento escolhido para a área.

De acordo com Kamani *et al.* (2015), podemos classificá-los em sete classes:

$$FE \leq 1: \text{ Não poluído;}$$

$1 < FE \leq 3$: Pouco a moderadamente poluído;

$3 < FE \leq 5$: Moderadamente poluído;

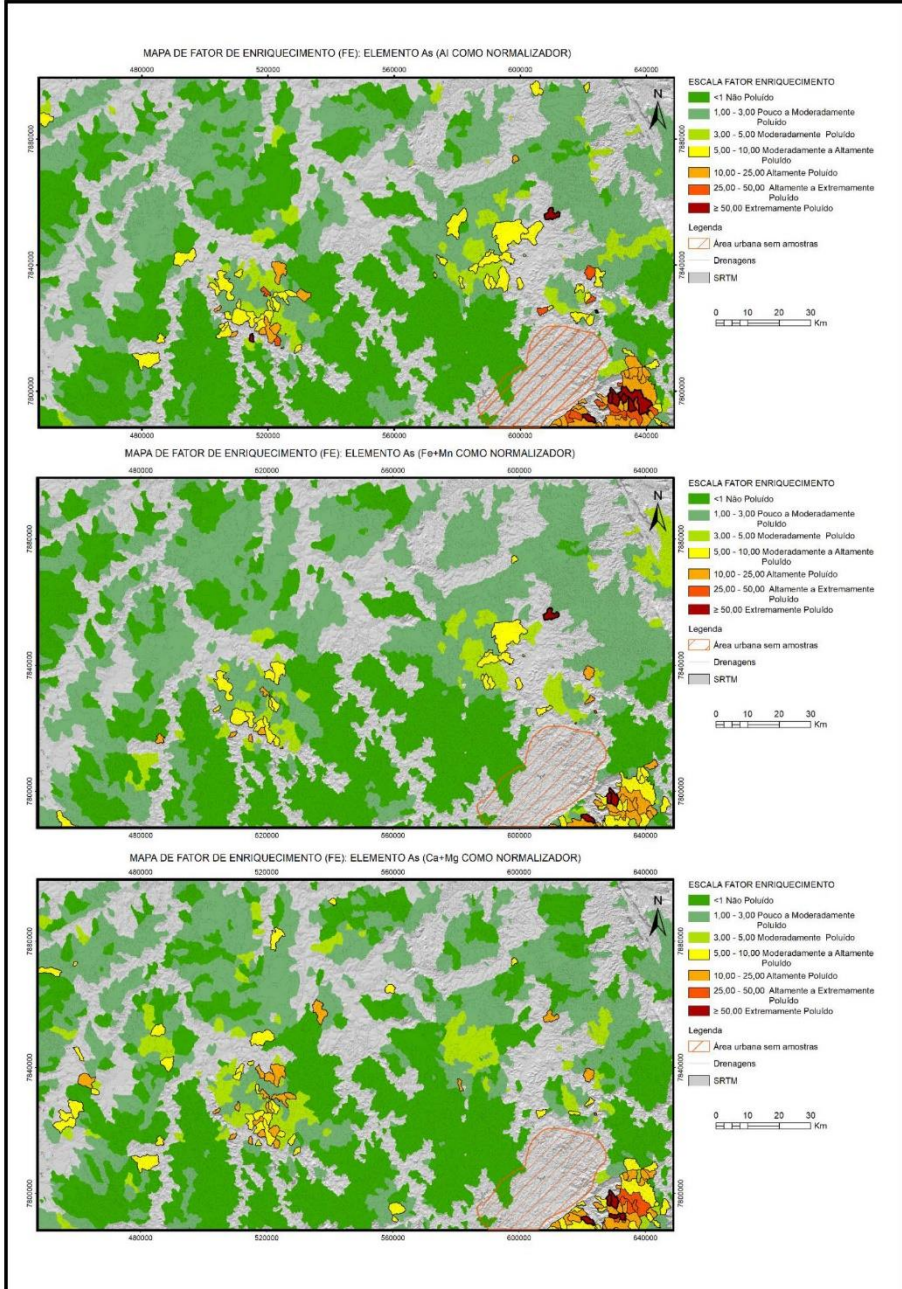
$5 < FE \leq 10$: Moderadamente altamente poluído;

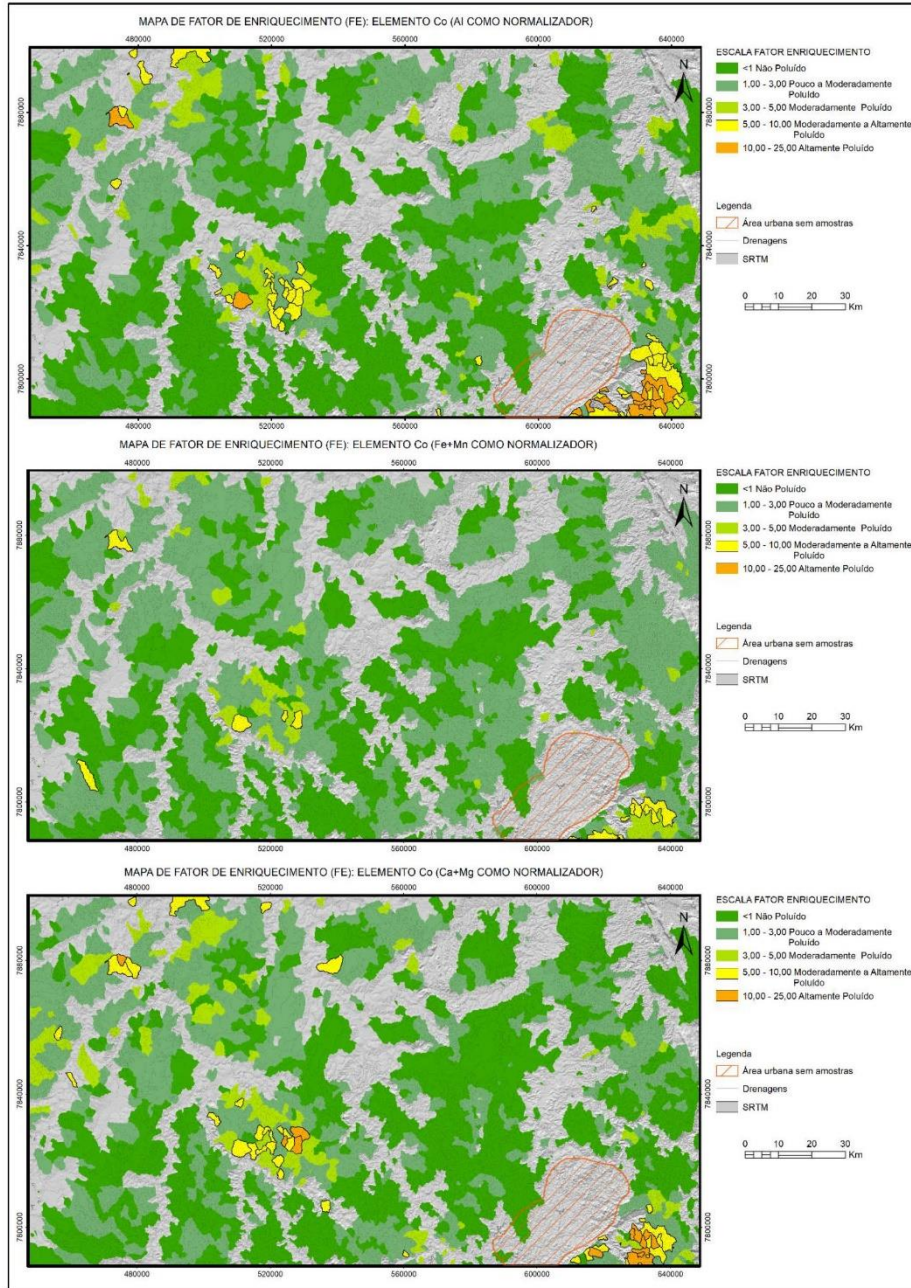
$$10 < FE \leq 25: \text{ Altamente poluído;}$$

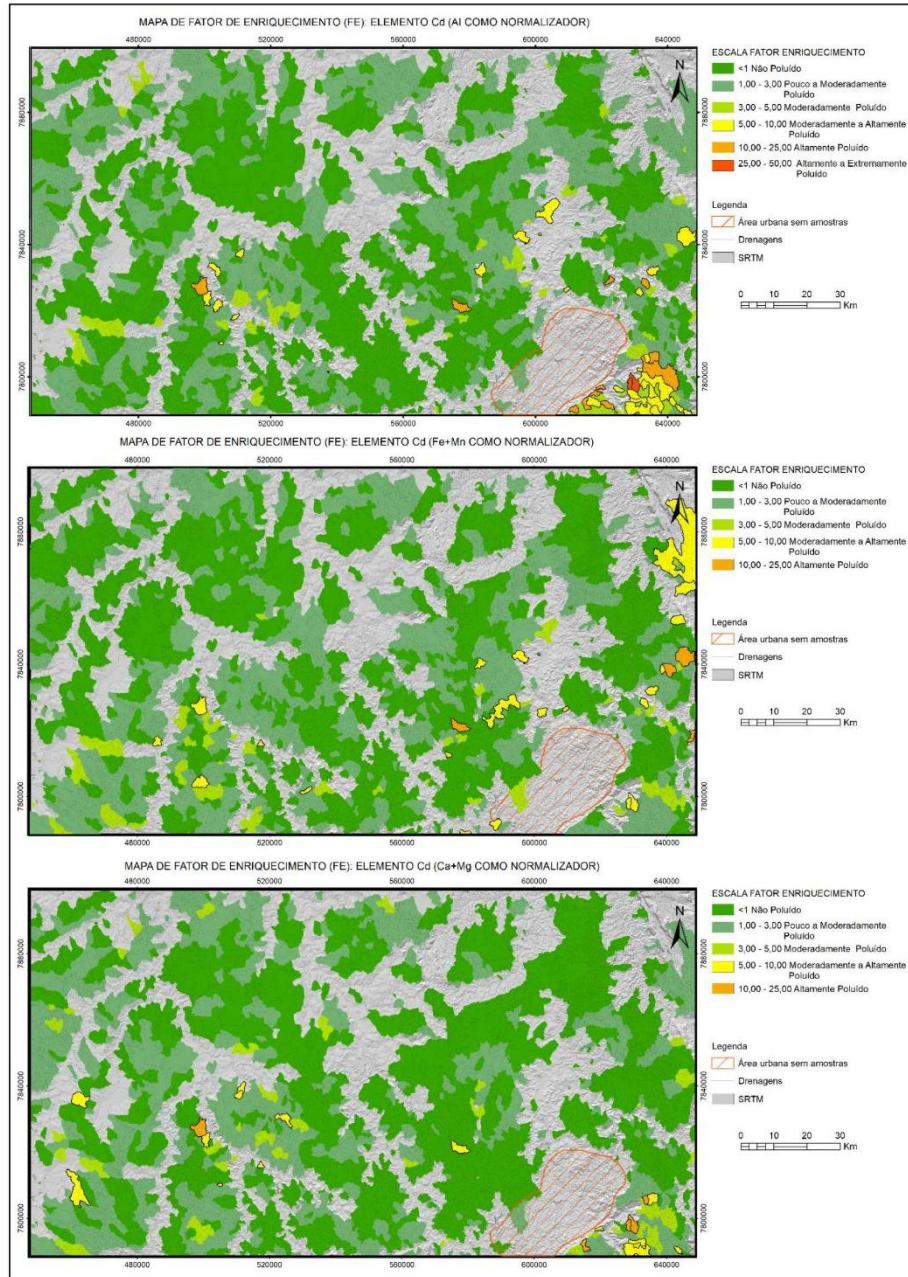
$25 < FE \leq 50$: Altamente a extremamente poluído;

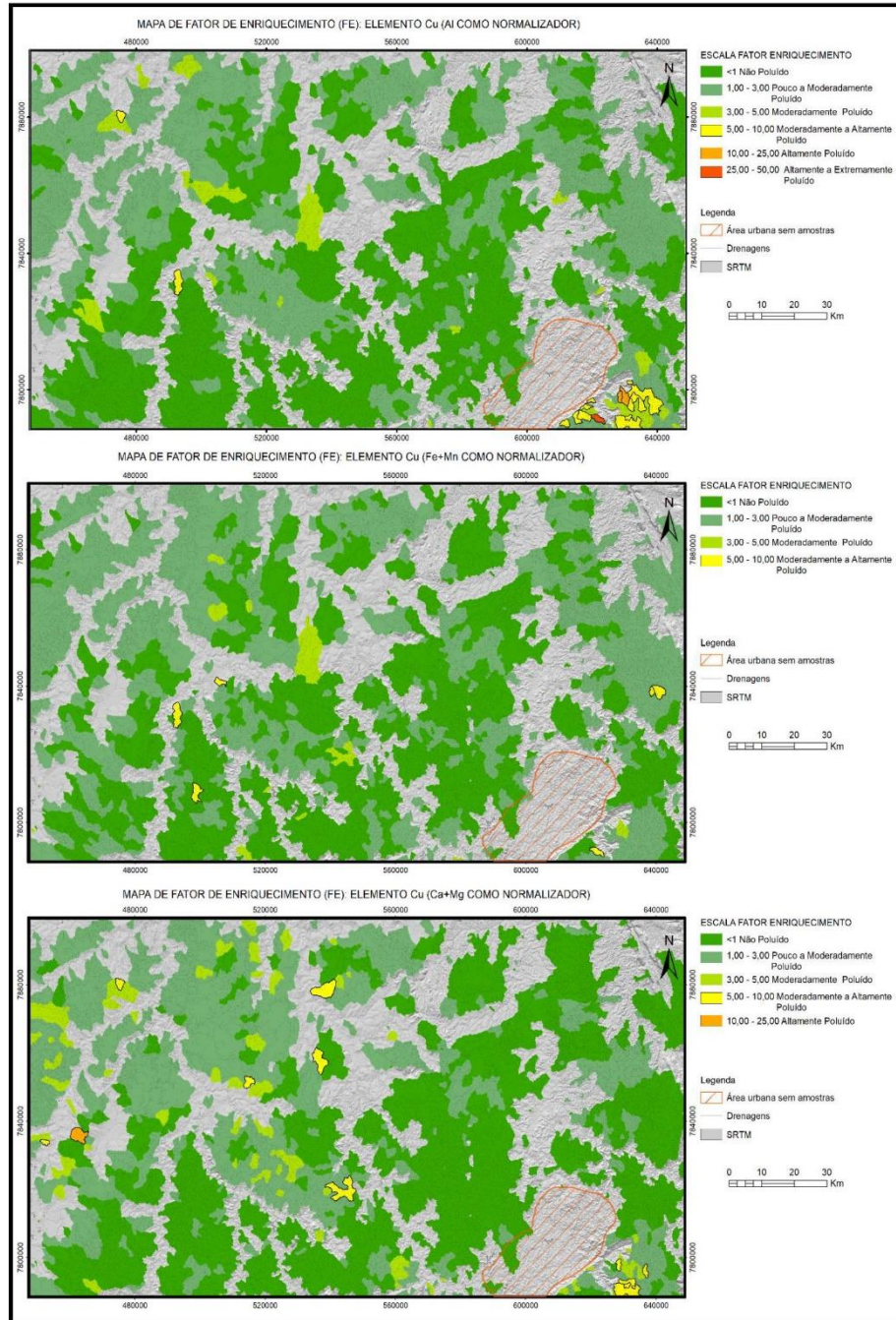
$$FE > 50: \text{ Extremamente poluído.}$$

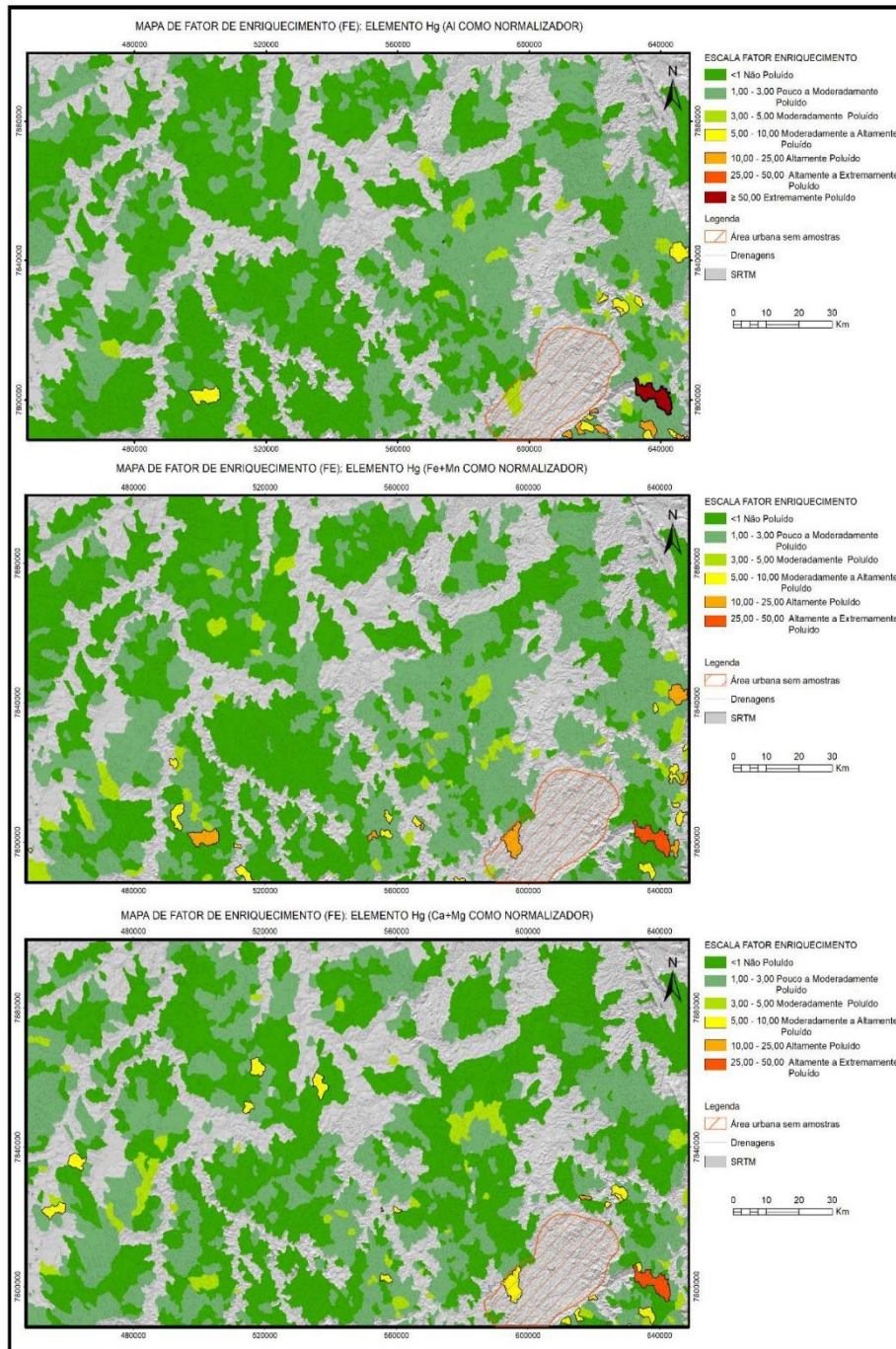
Mapas de Fator de Enriquecimento (FE) – Elementos As, Cd, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, U e Zn. Tratamento global dos dados.

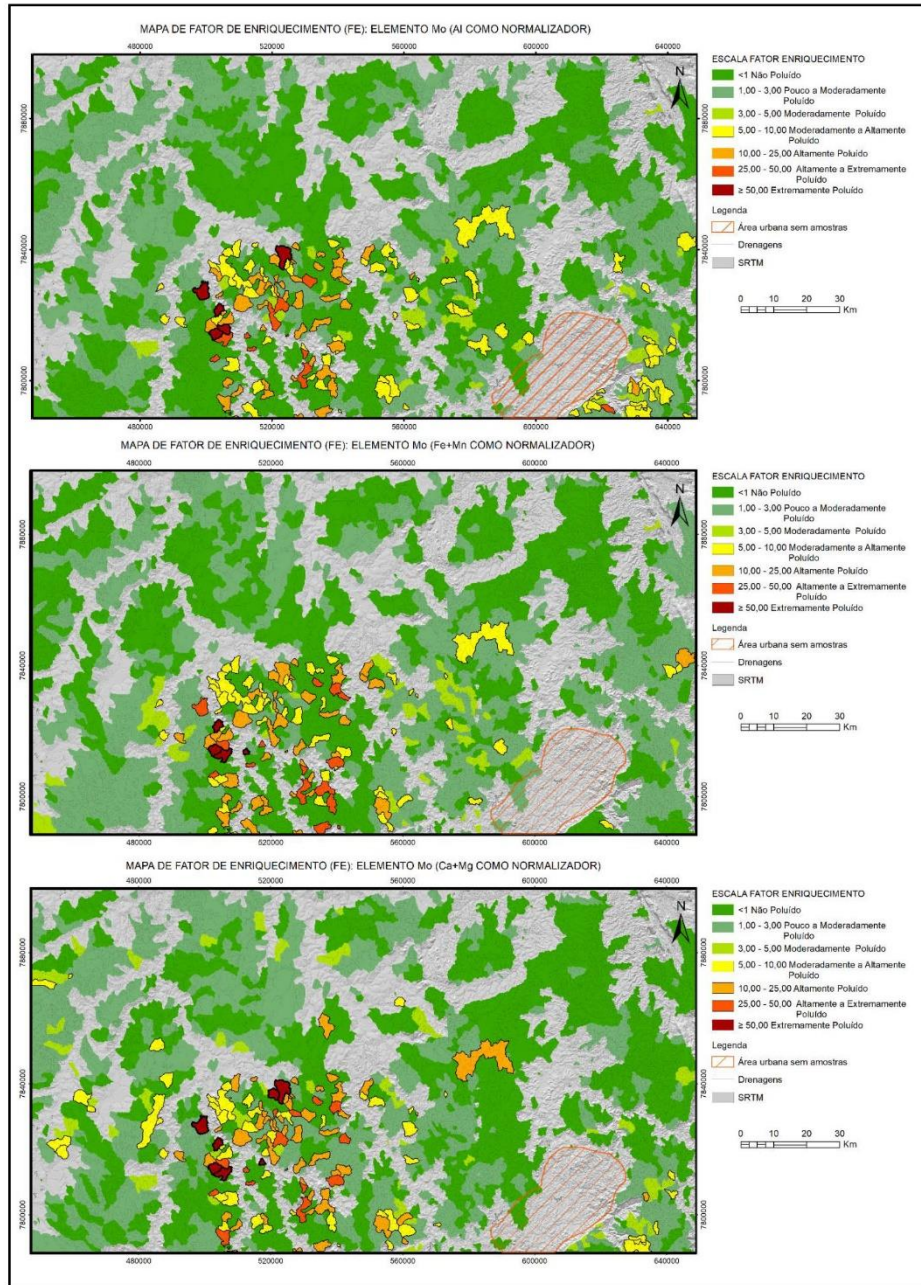


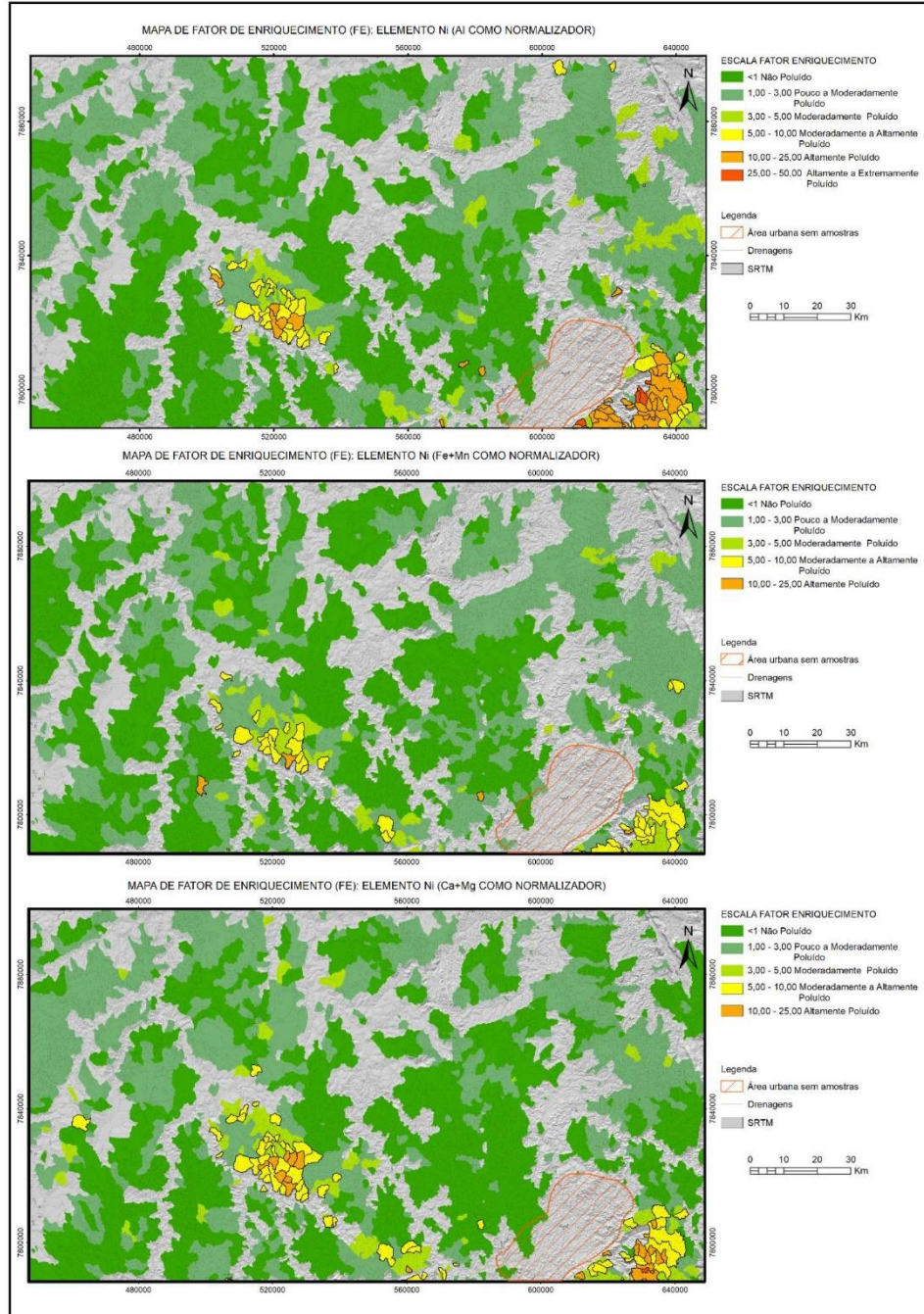


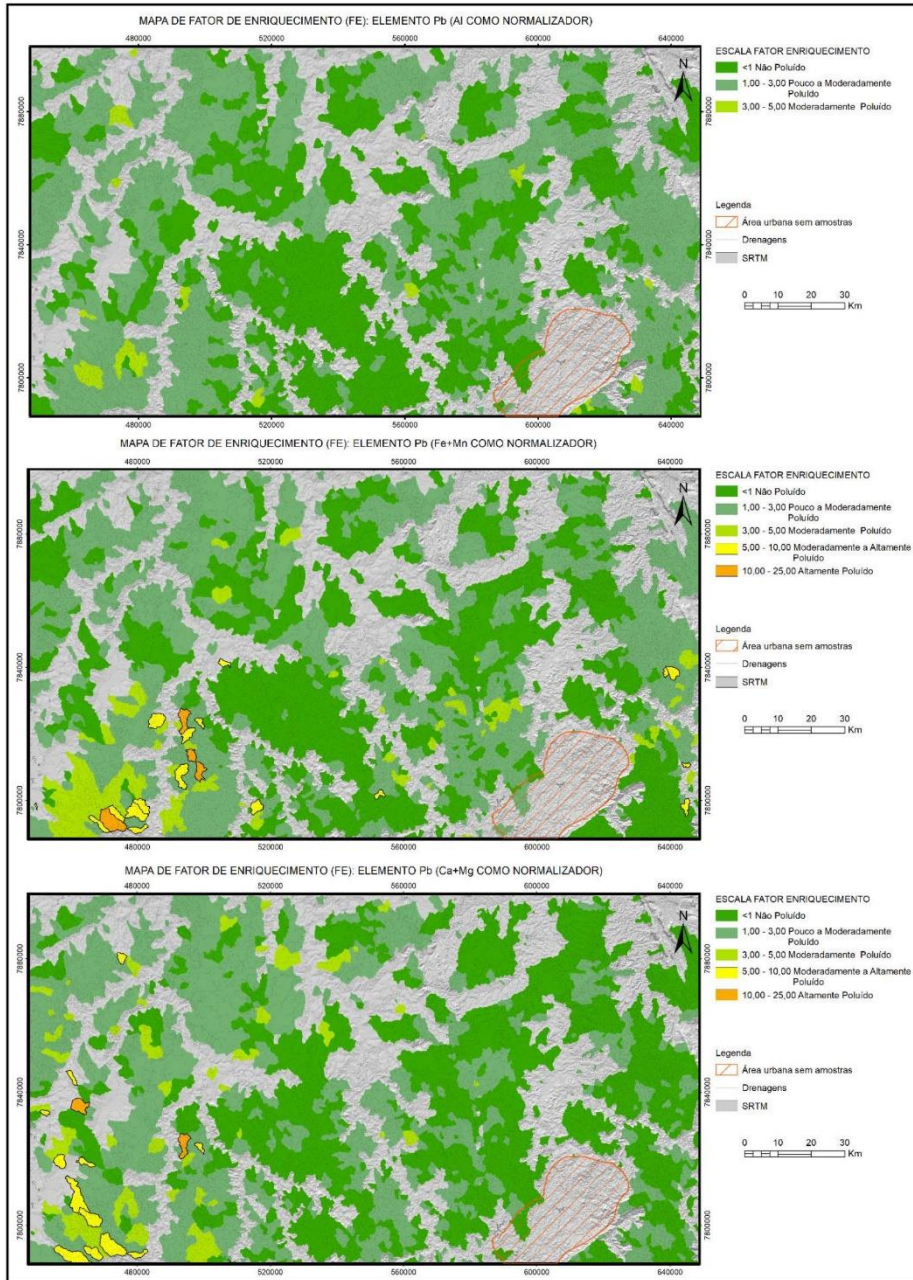


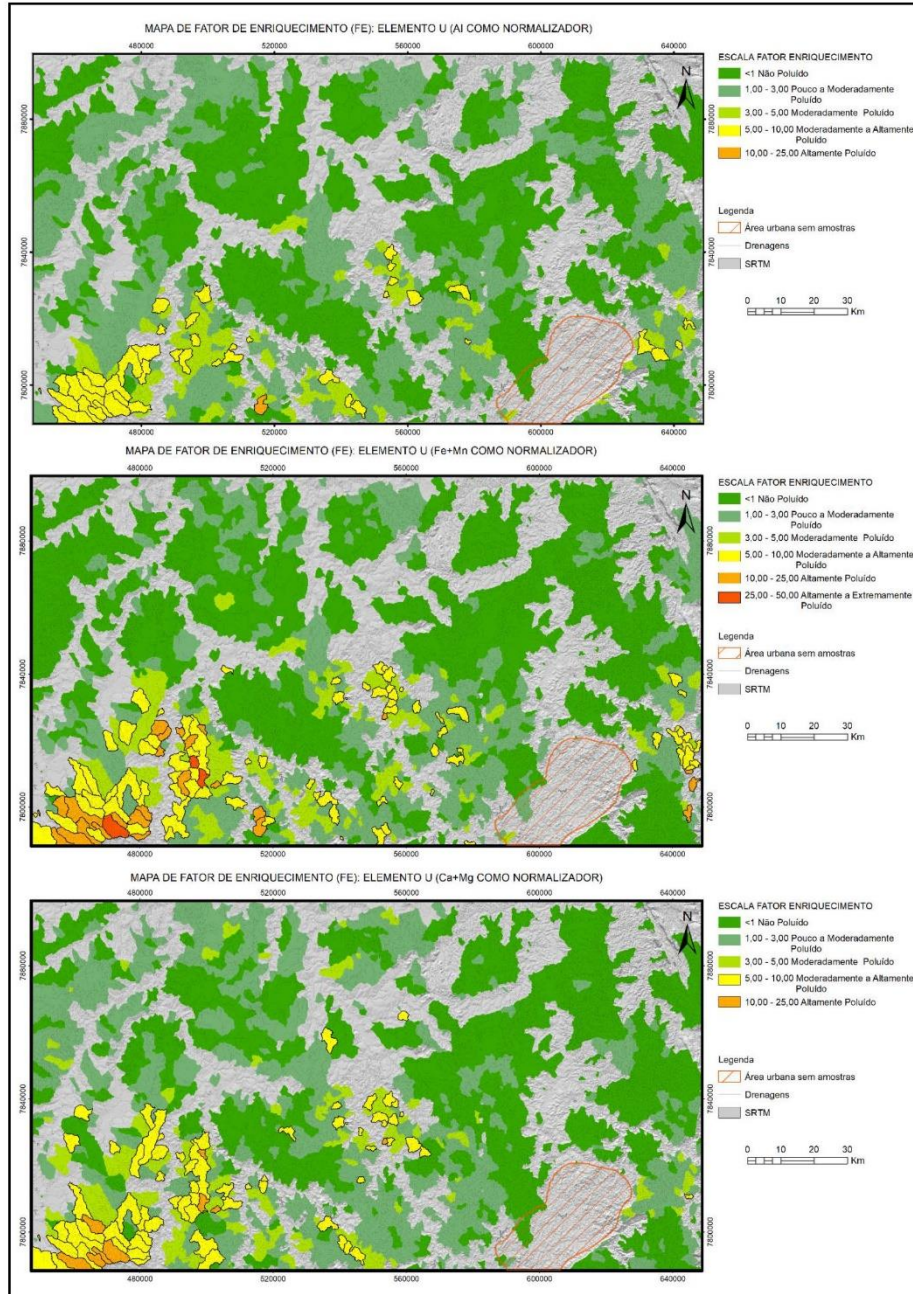


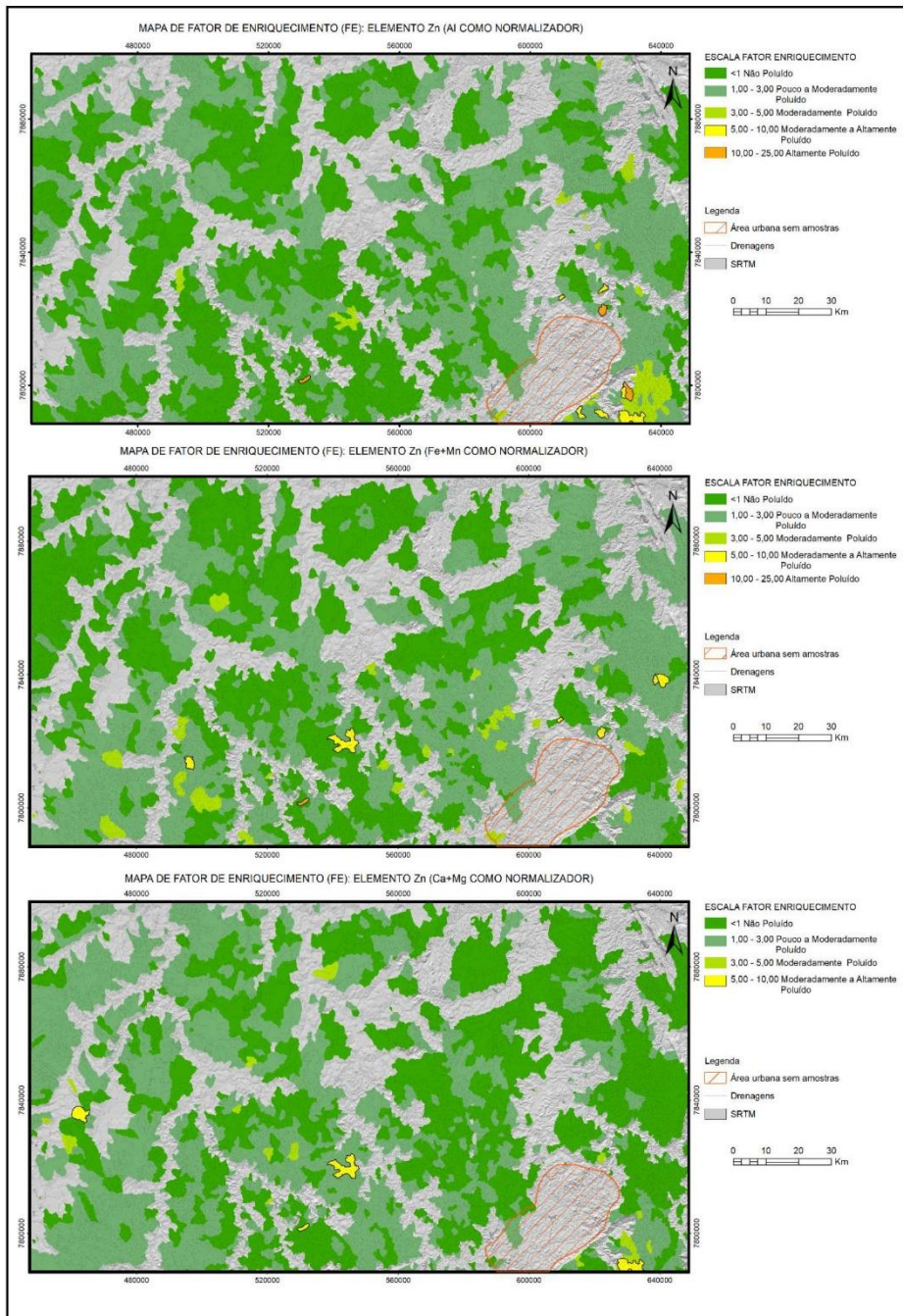




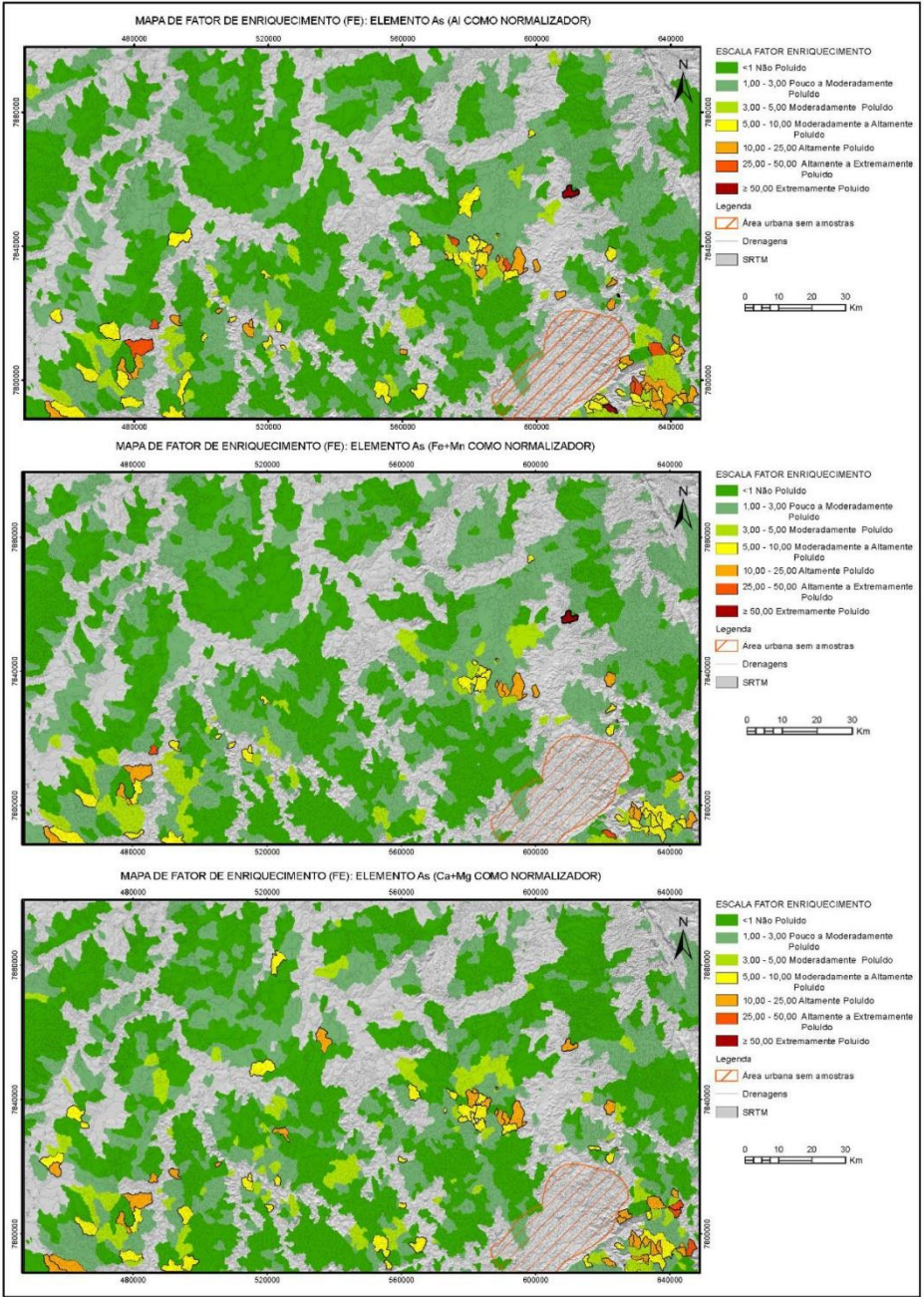


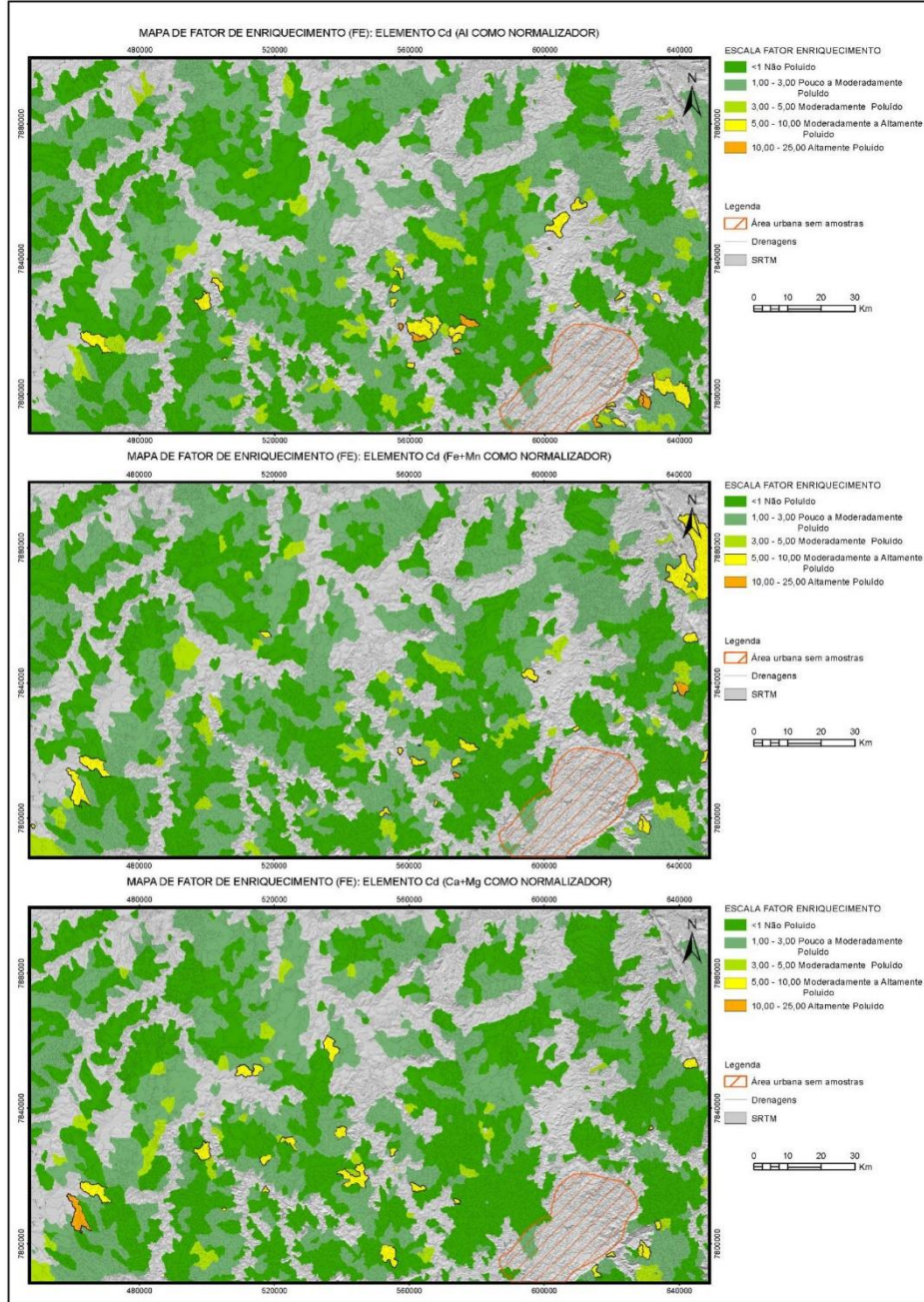


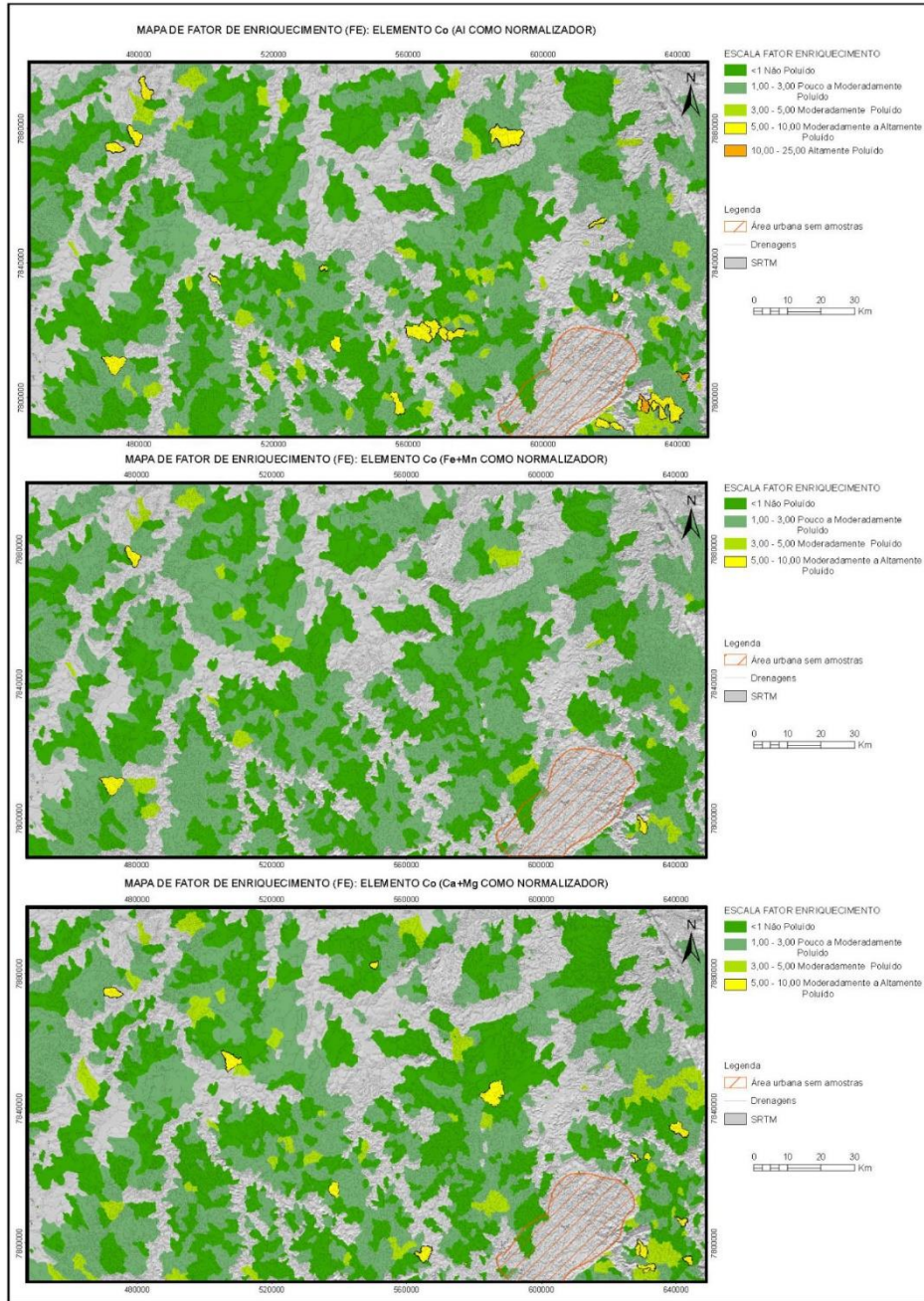


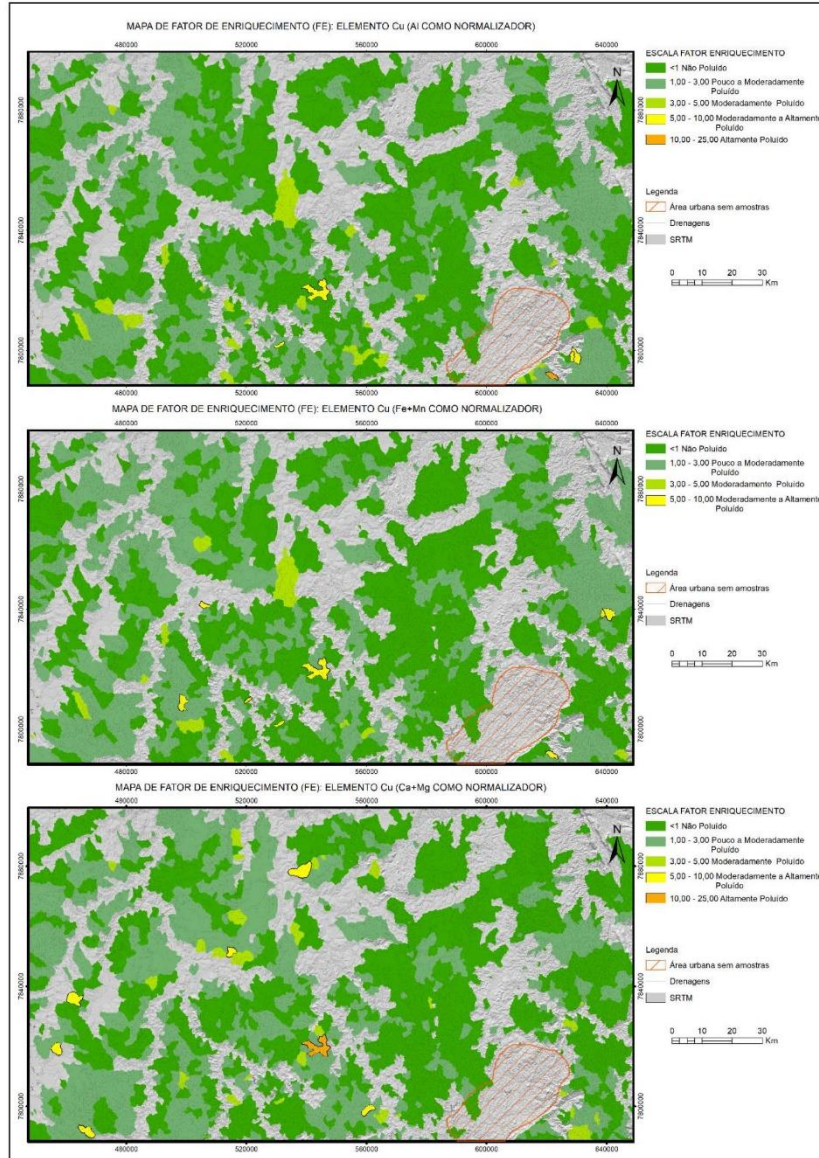


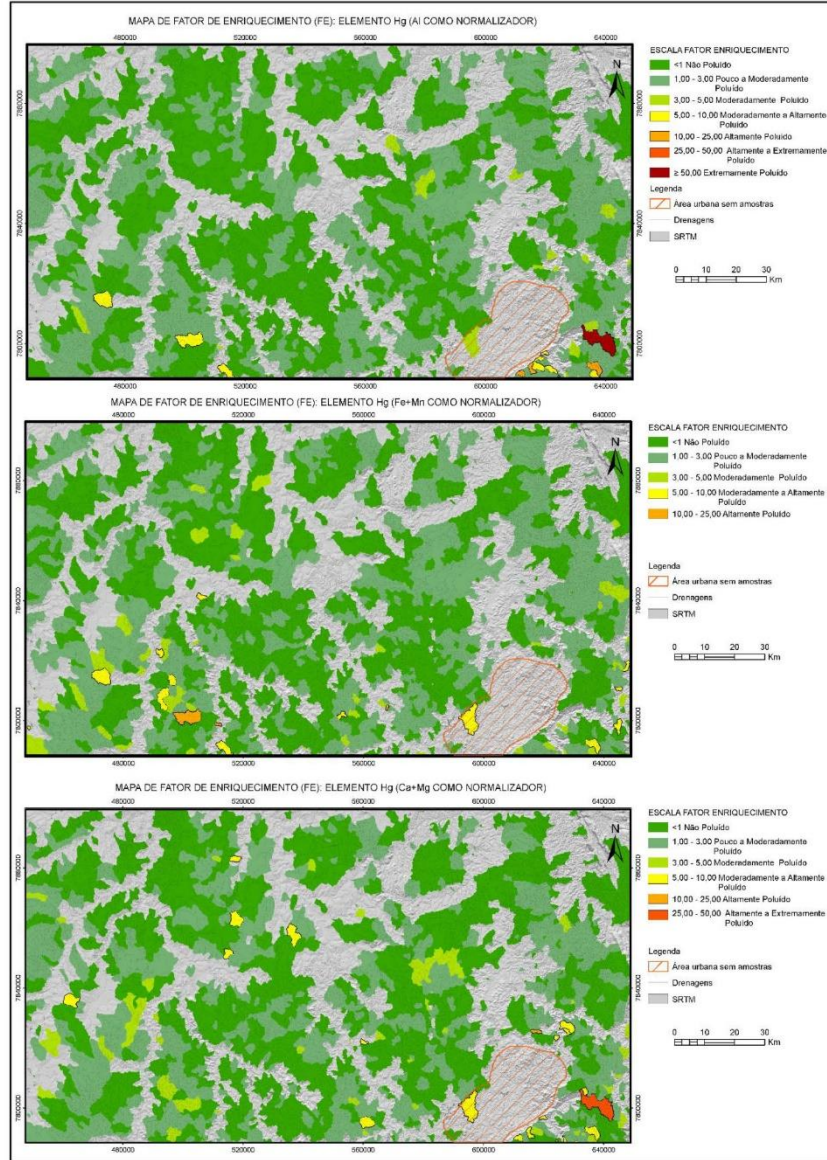
Mapas de Fator de Enriquecimento (FE) – Elementos As, Cd, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, U e Zn. Tratamento dos dados por unidade geológica.

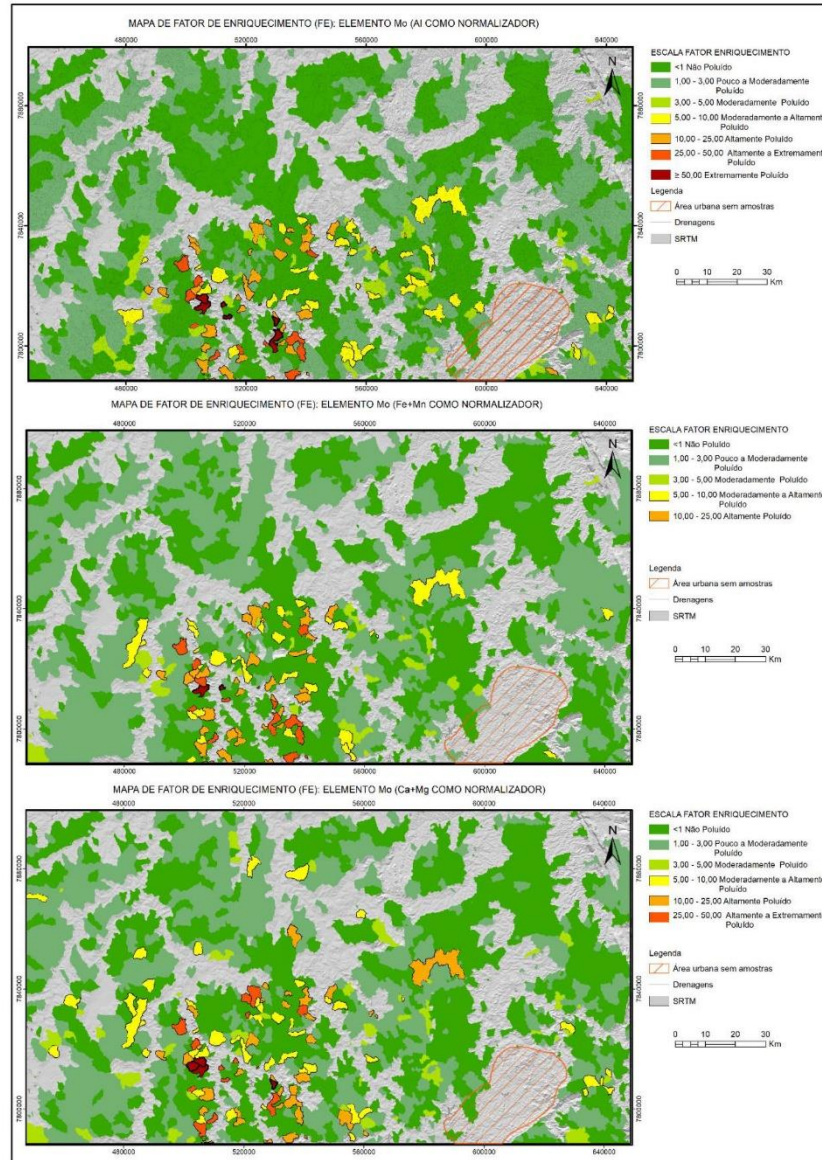


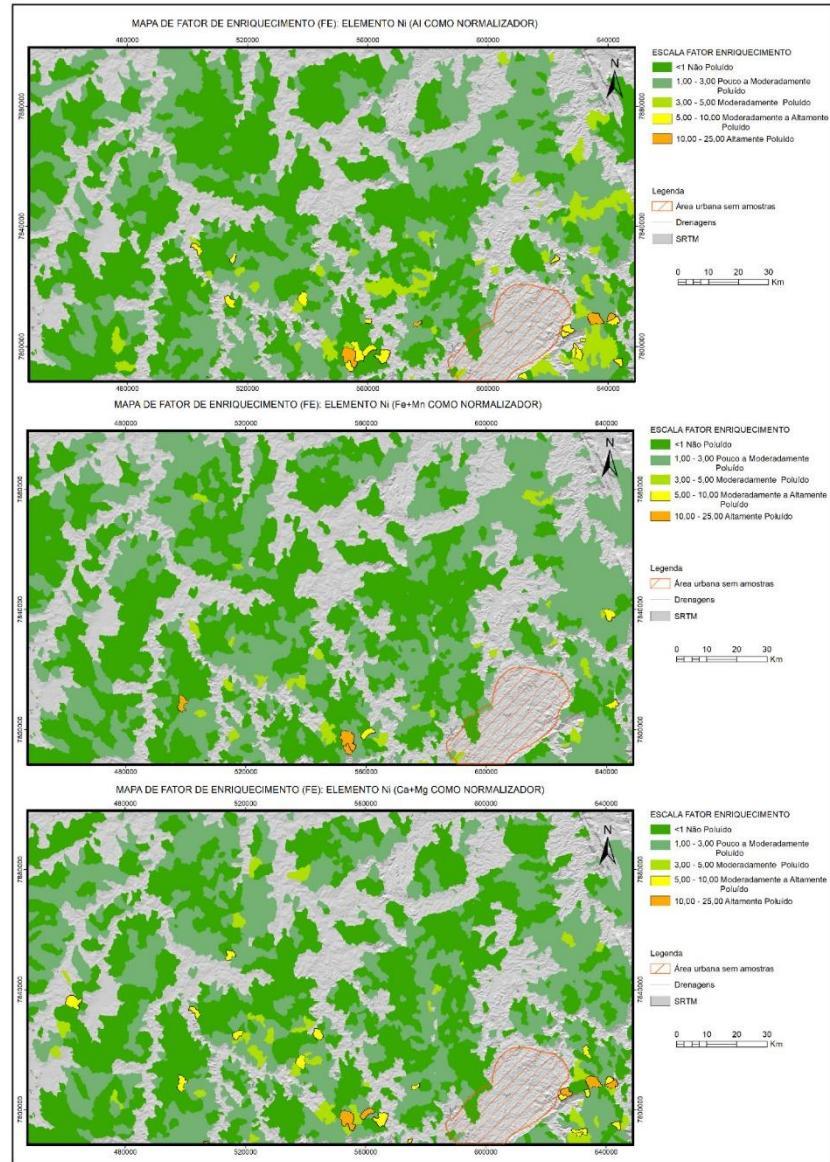


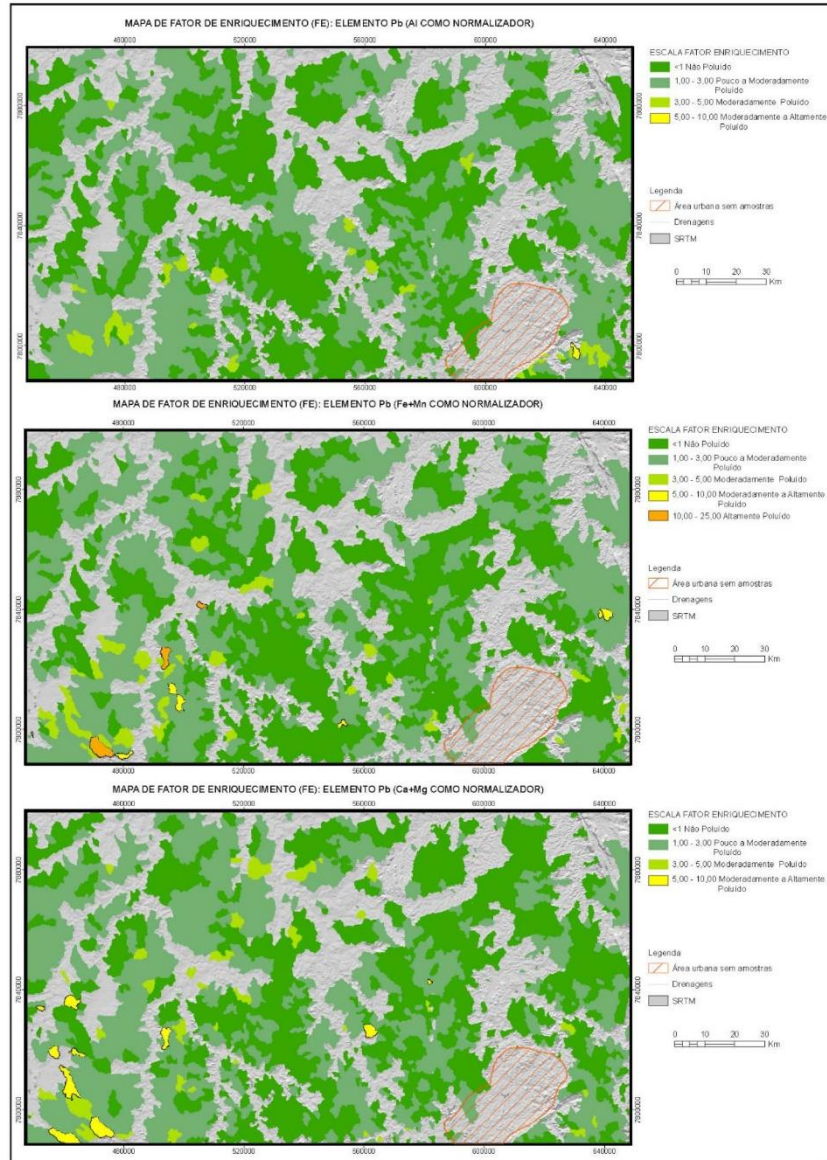


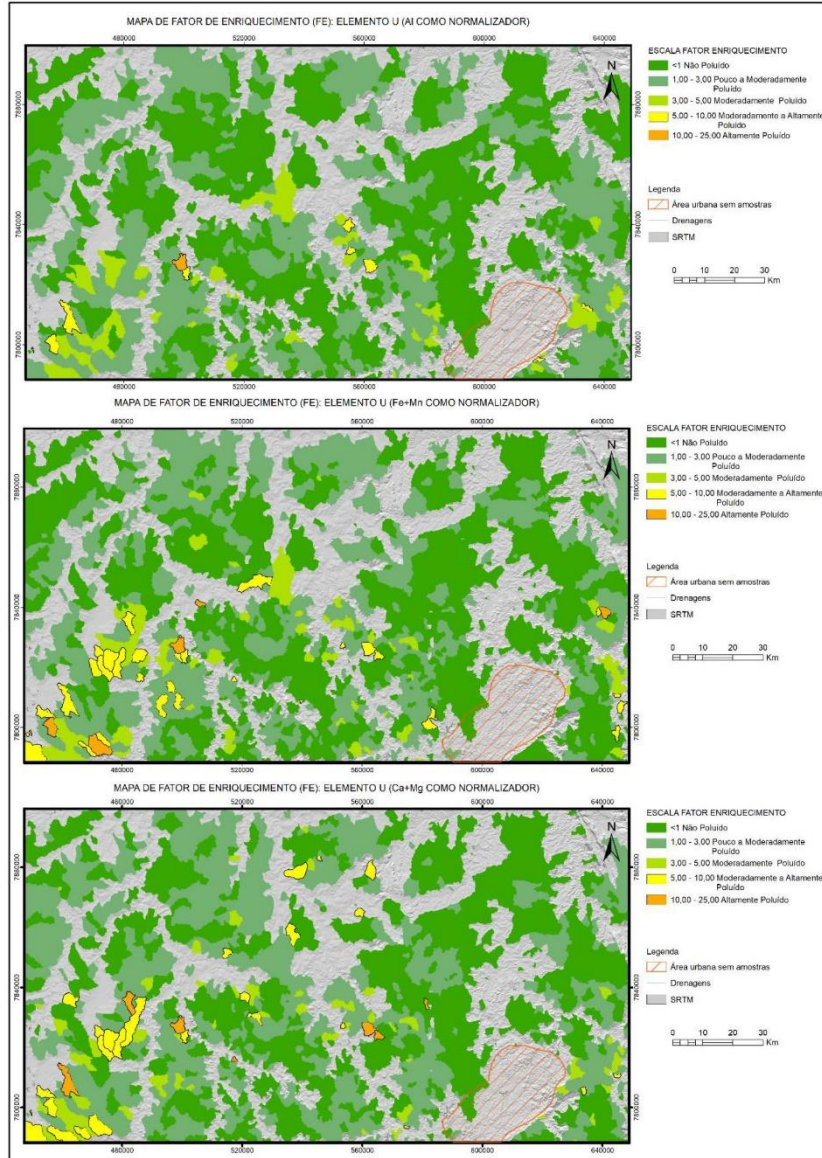


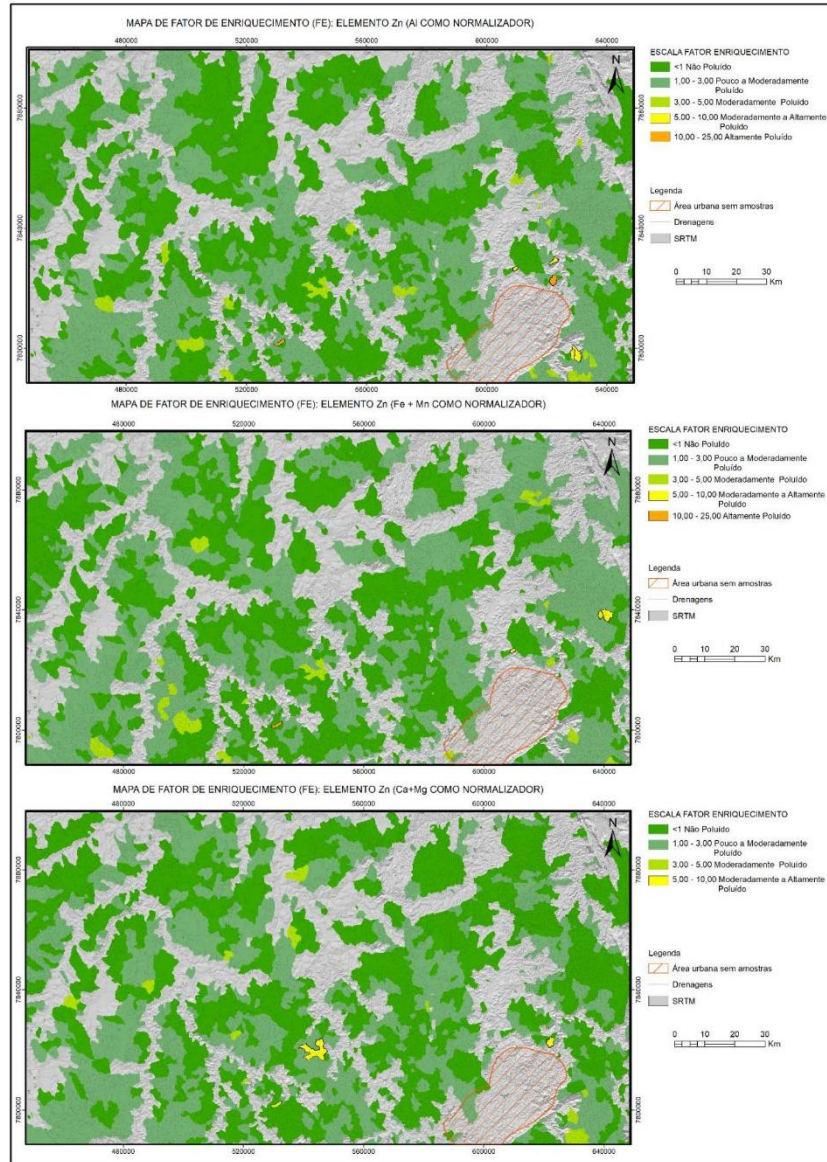












Fator de Contaminação

O Fator de Contaminação (FC) é a razão entre o metal contido no sedimento para o valor de referência do metal (*background*) da área de estudo. É uma ferramenta efetiva para monitorar a poluição em um período de tempo (SIVAKUMAR et al., 2016). É calculado da seguinte forma:

$$FC = C_s / C_{BG}$$

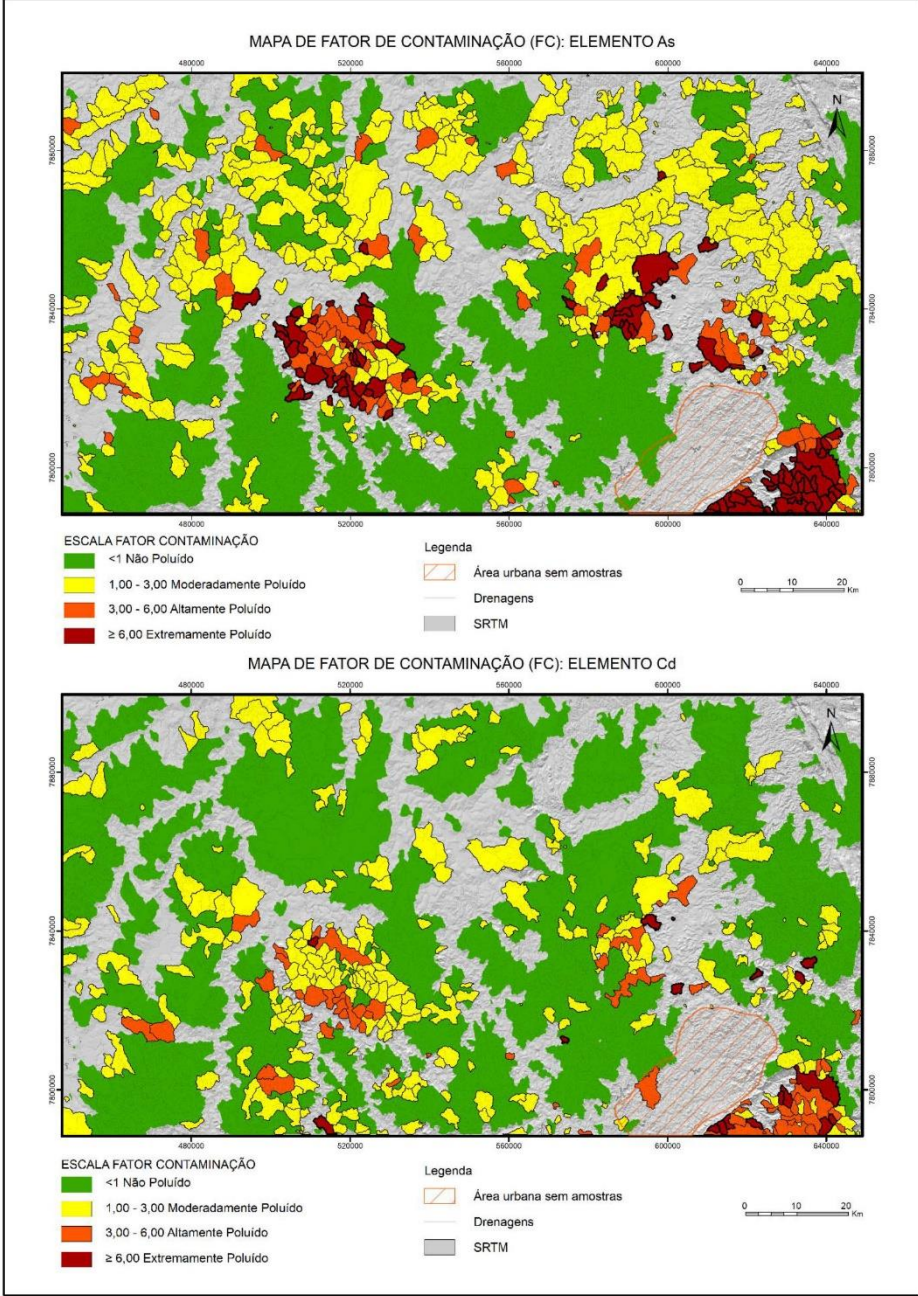
Onde: C_s é a concentração do metal poluente na amostra; e C_{BG} é a

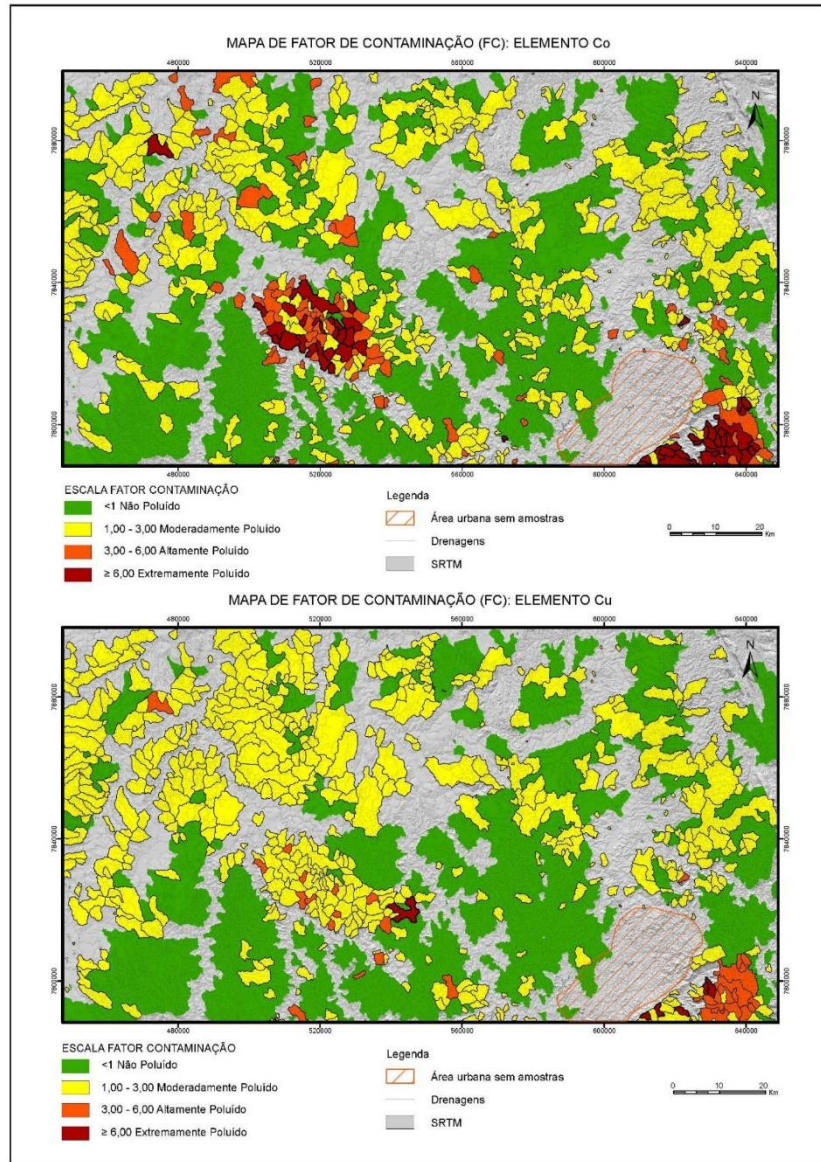
concentração do *background* calculado do metal poluente para a área de estudo.

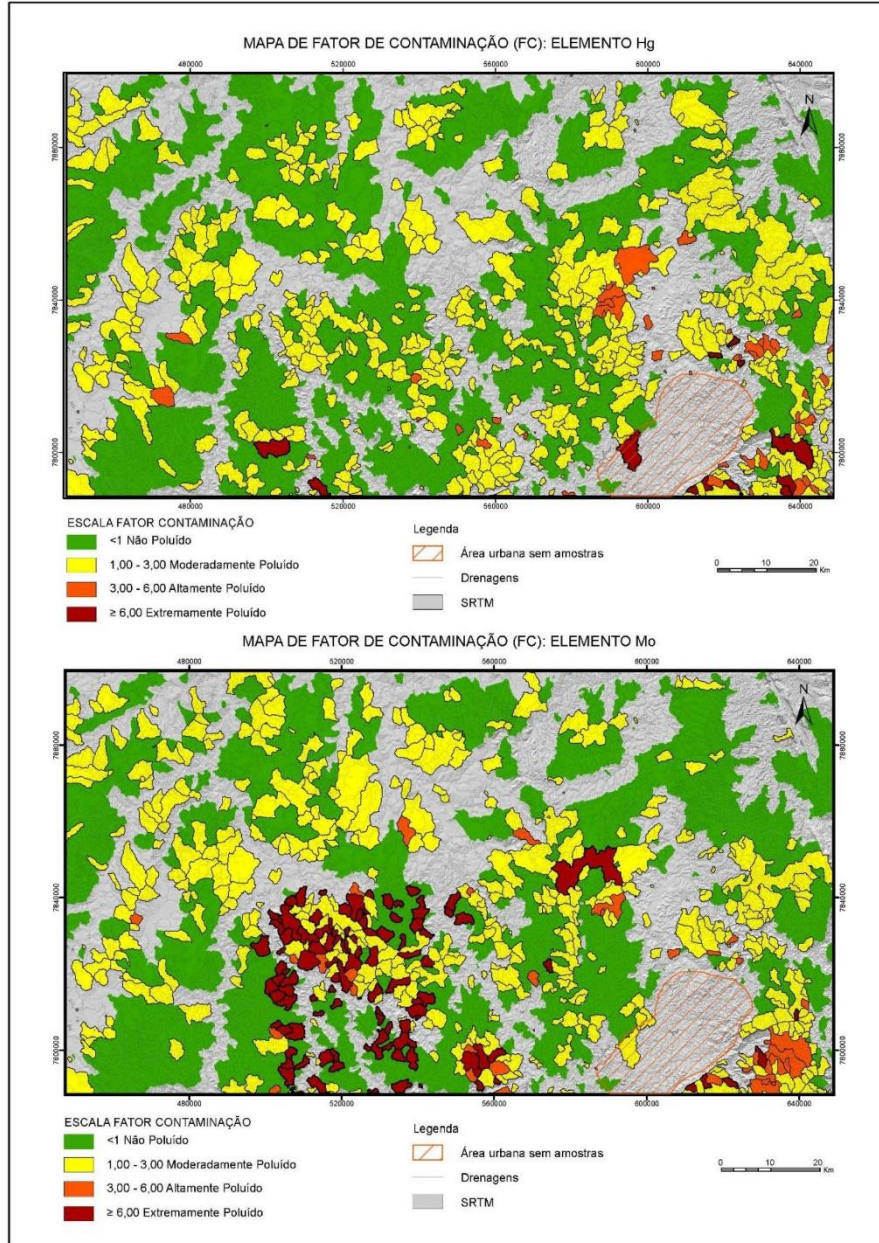
De acordo com Hakanson (1980):

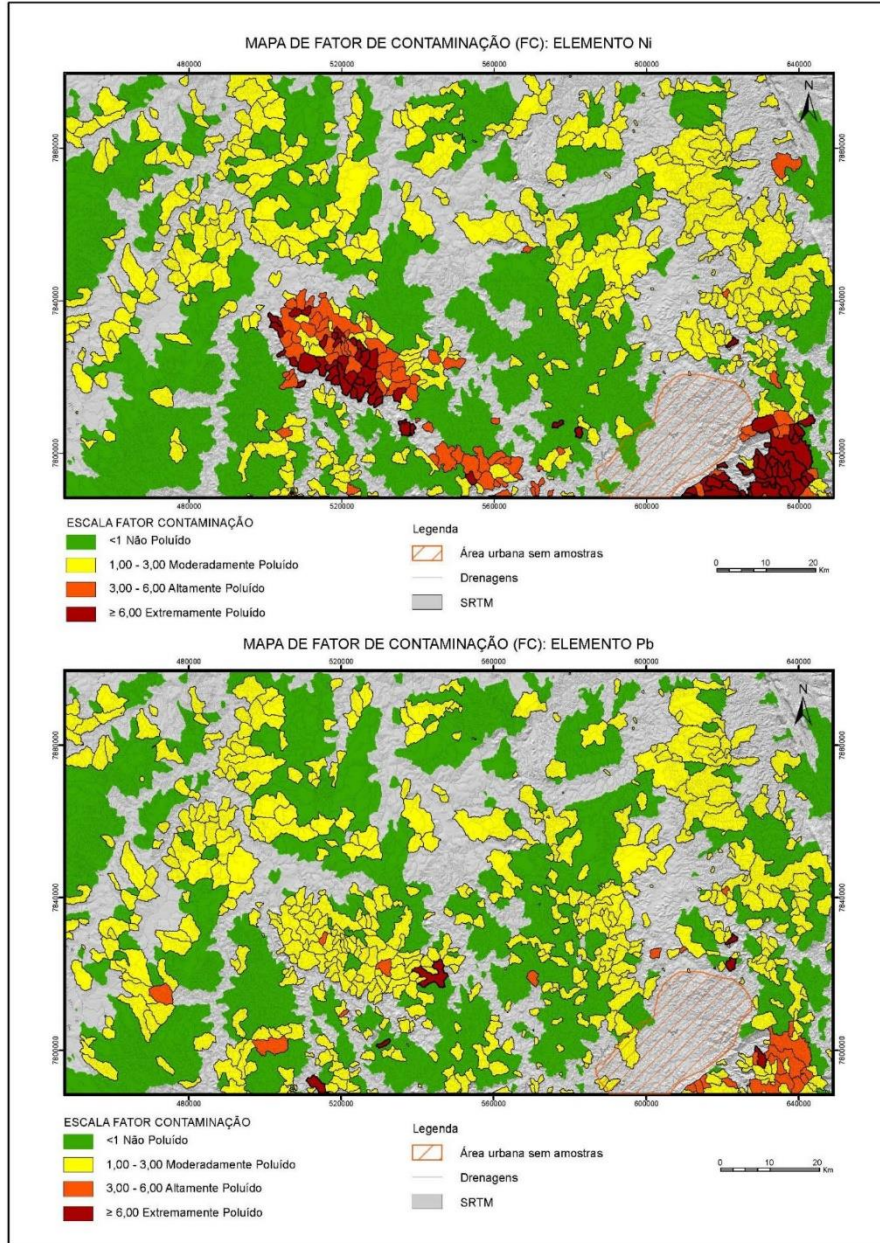
- $FC < 1$: indica baixa contaminação;
- $1 < FC < 3$: é moderada contaminação;
- $3 < FC < 6$: é considerável contaminação;
- $FC > 6$: é alta contaminação.

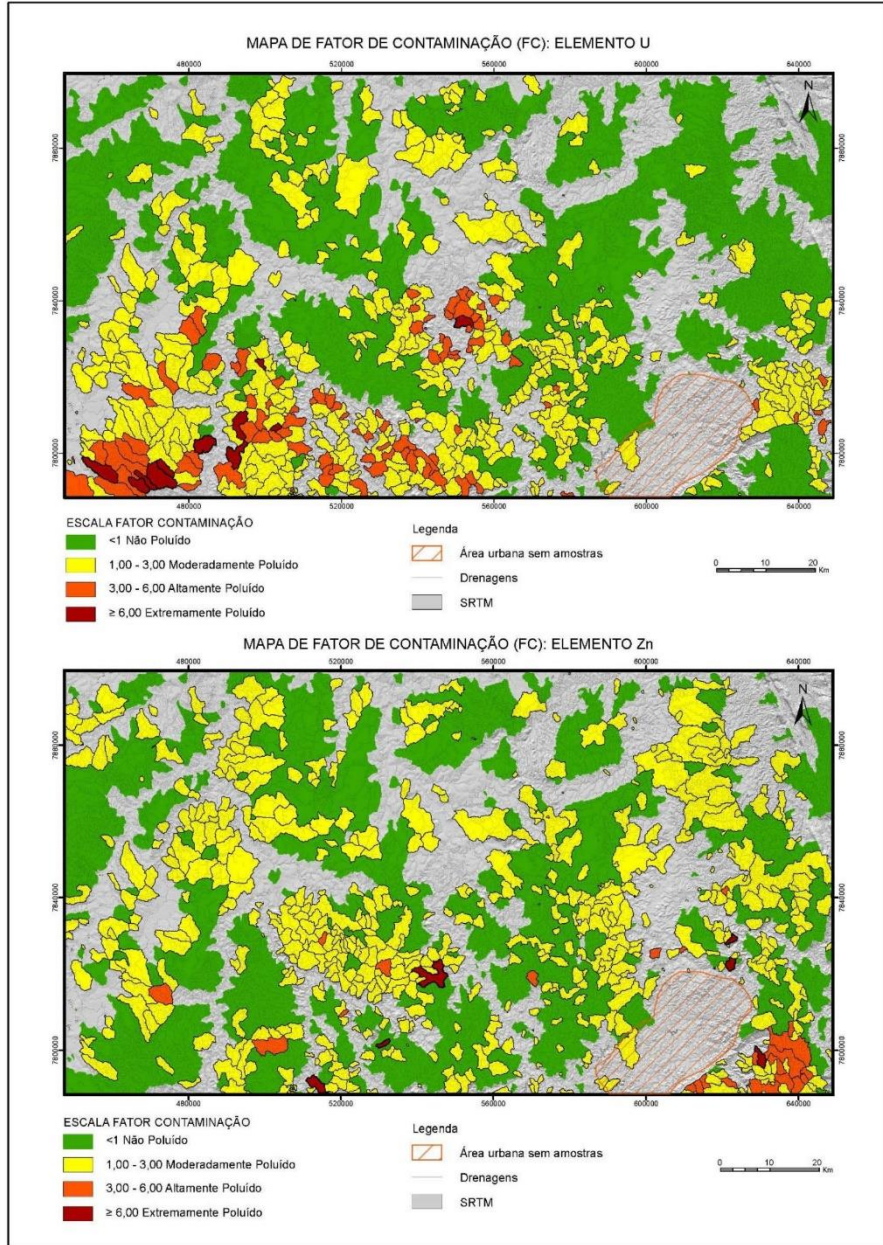
Mapas de Fator de Contaminação (FC) – Elementos As, Cd, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, U e Zn.
Tratamento global dos dados.



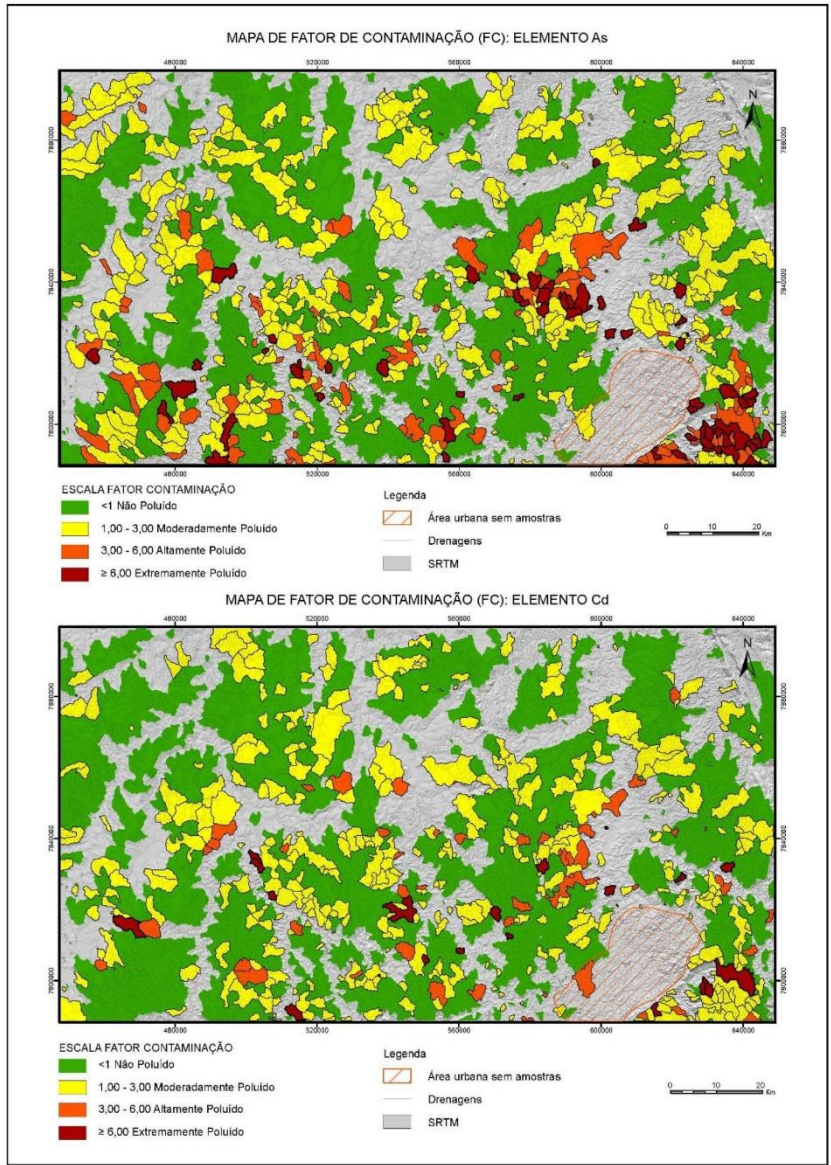


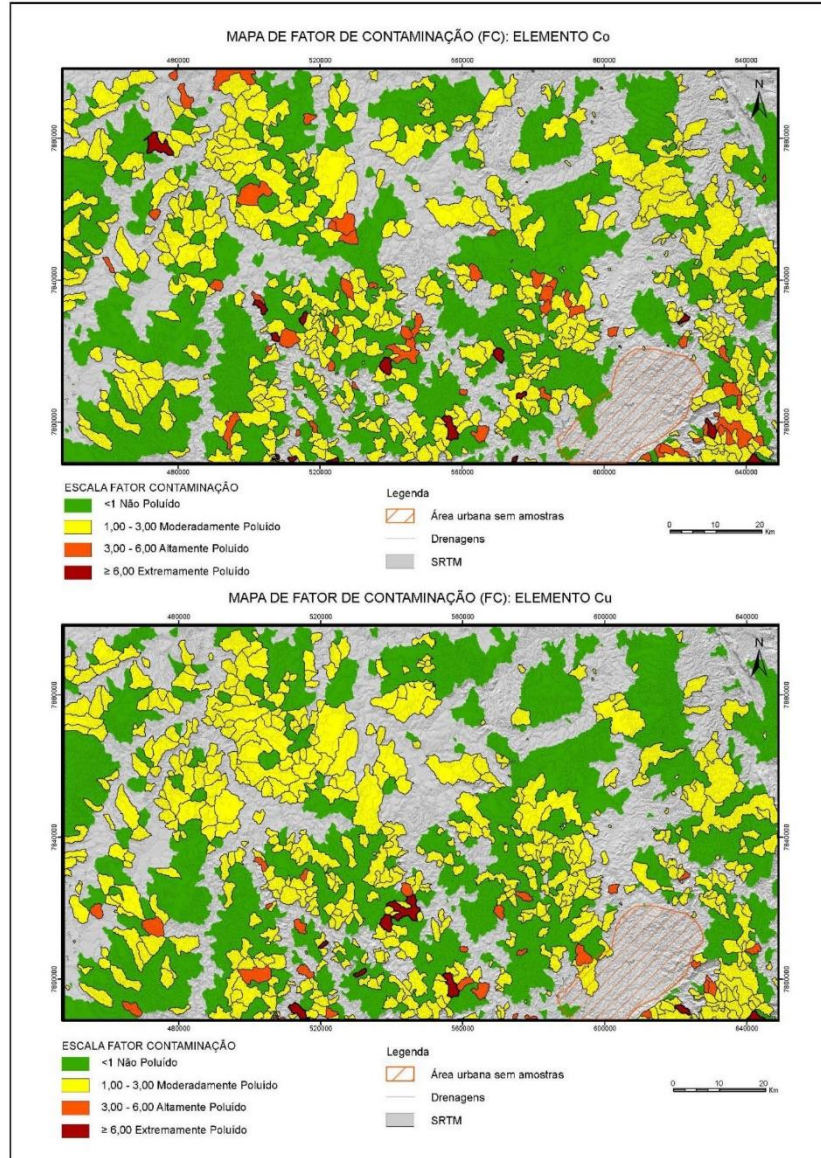


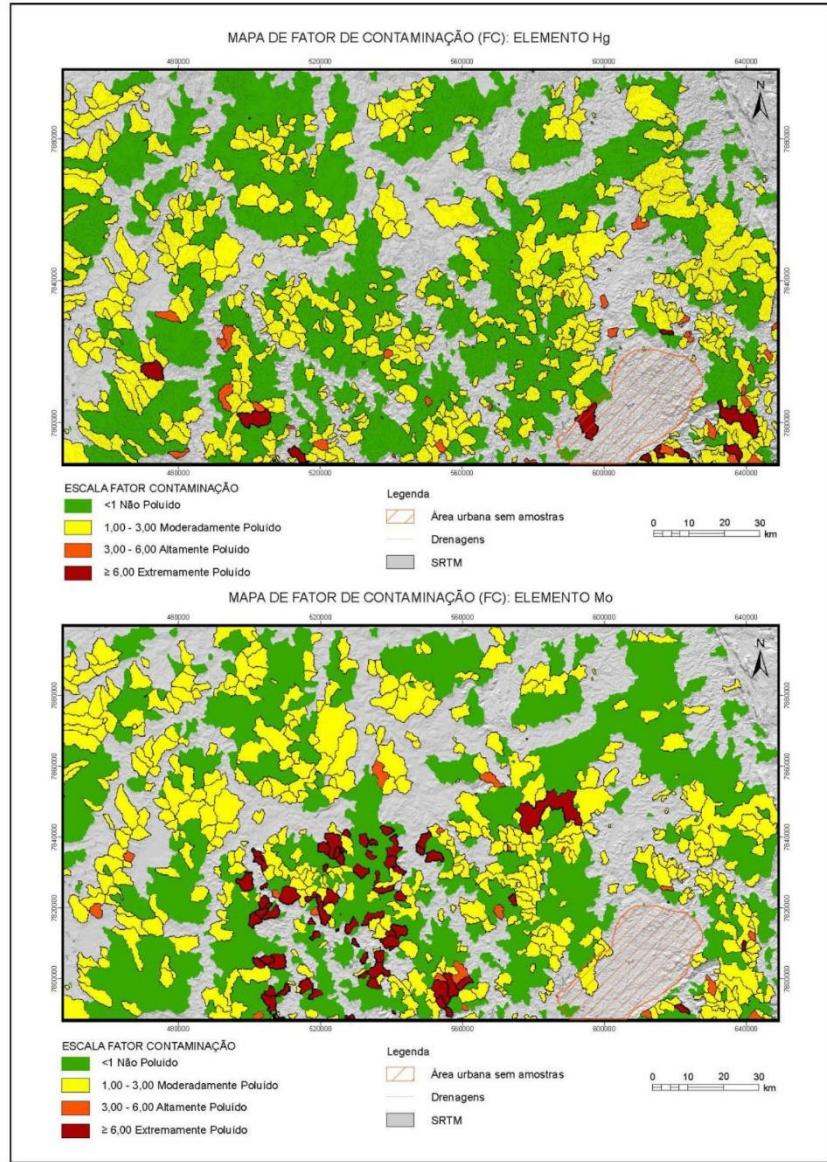


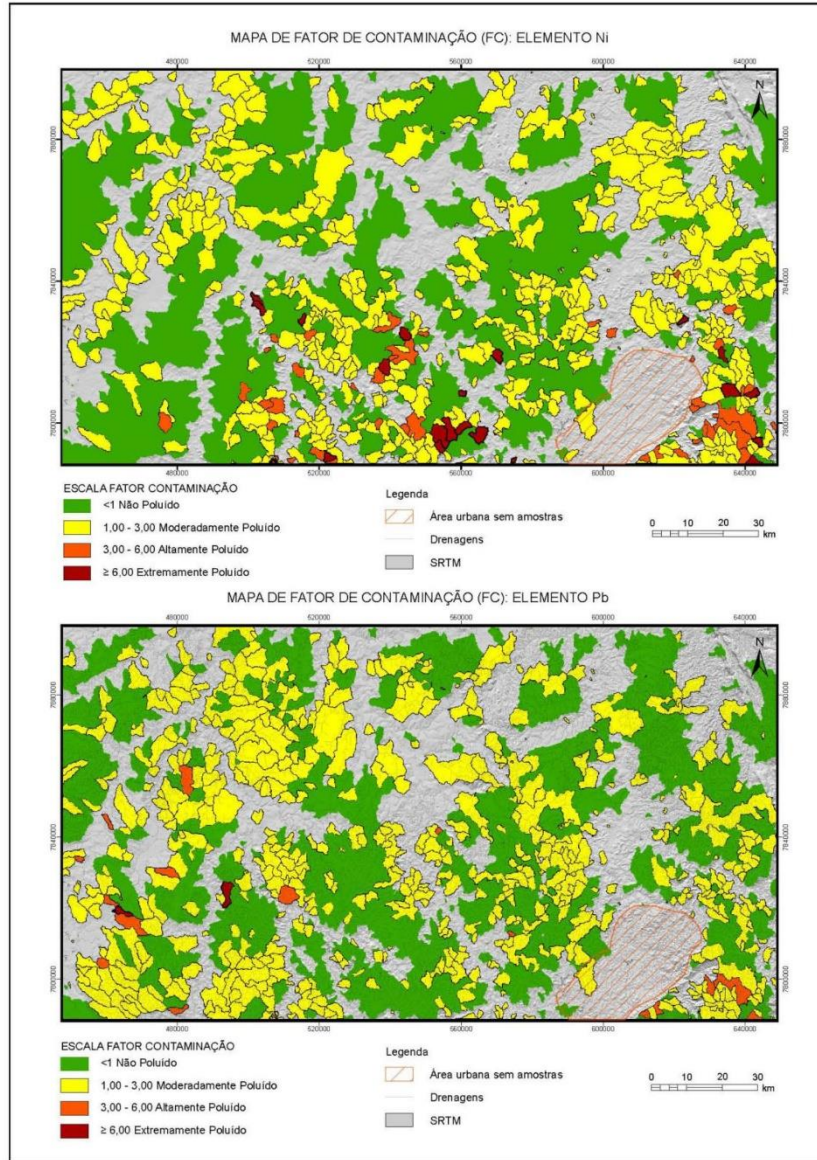


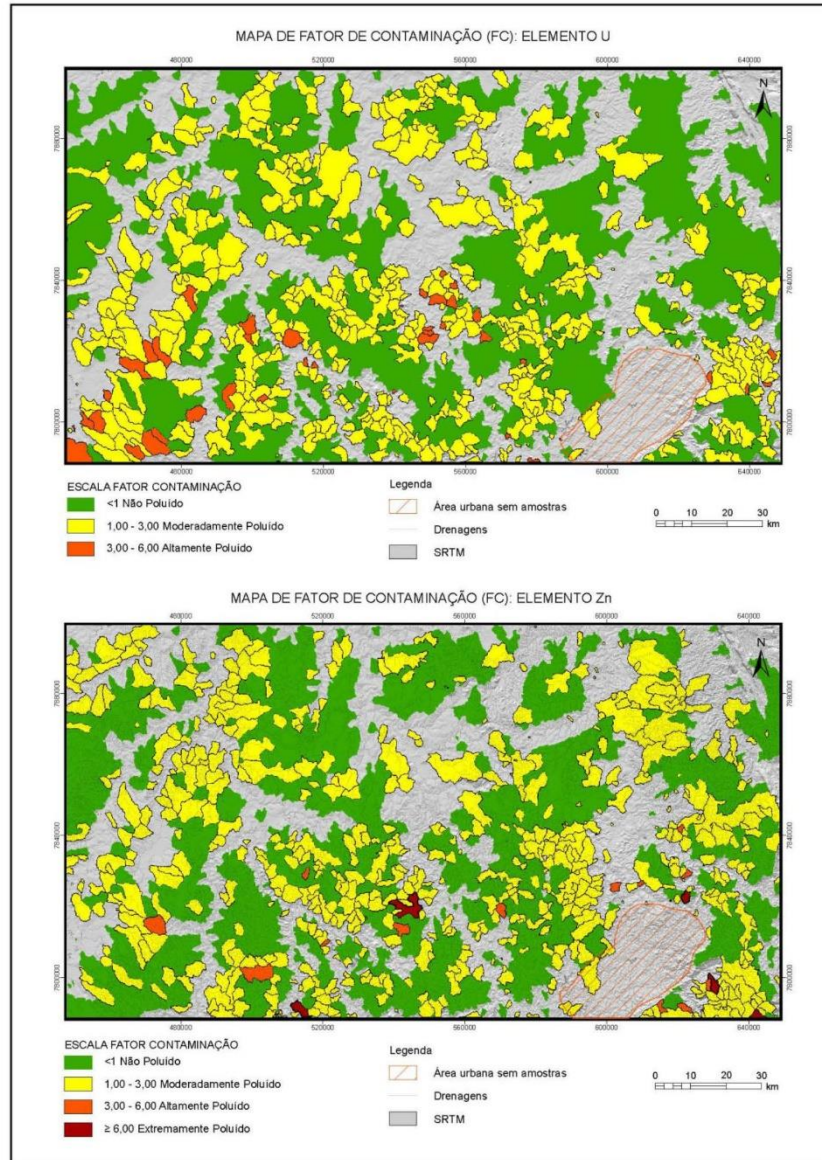
Mapas de Fator de Contaminação (FC) – Elementos As, Cd, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, U e Zn.
Tratamento dos dados por unidade geológica.











Índice de Poluição

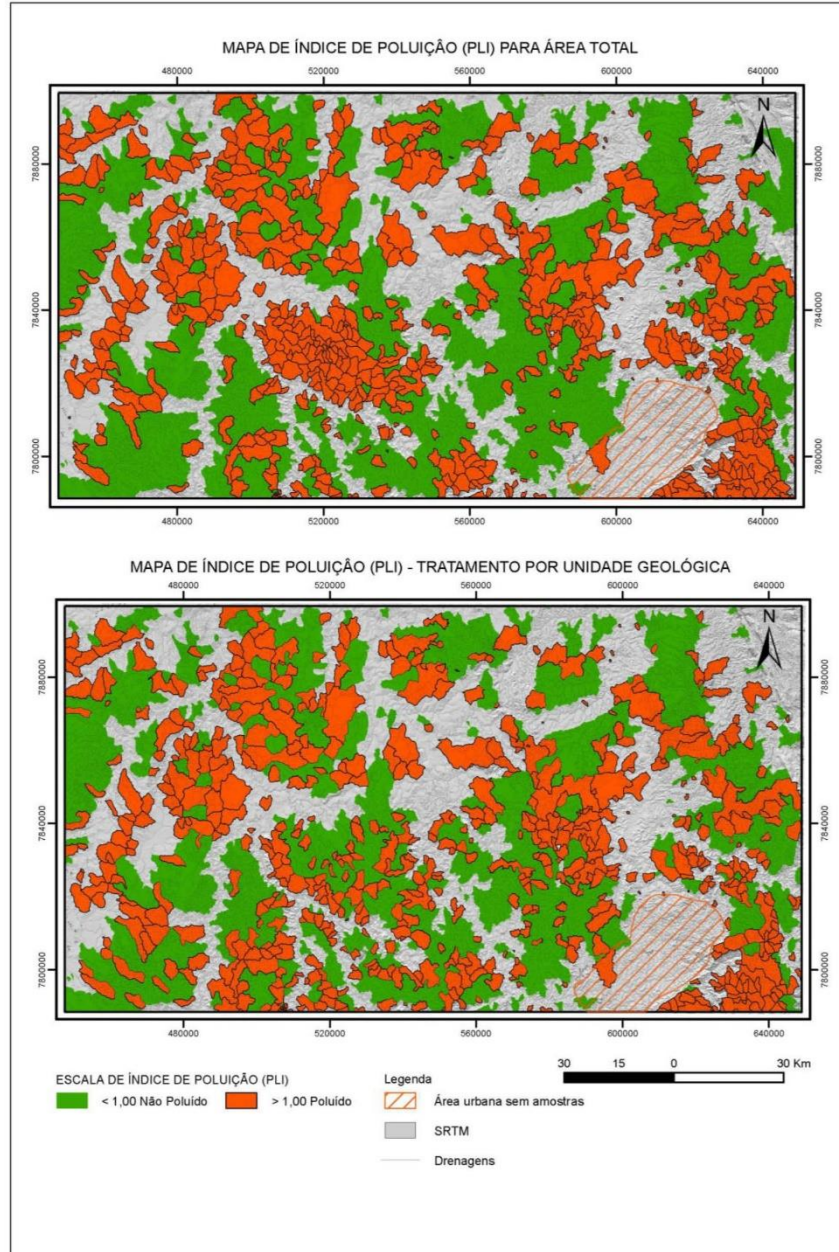
O Índice de Poluição (PLI) representa o número de vezes pelo qual a concentração do metal pesado no sedimento ultrapassou o valor de referência (*background*). É obtido pela somatória dos fatores de contaminação (FC) já obtidos, multiplicados entre si e elevados à potência fracionada do número de metais poluentes considerados (n). O PLI indica o nível geral

de metal pesado poluente em uma amostra (SIVAKUMAR *et al.*, 2016).

$$PLI = \sqrt[n]{FC1 \times FC2 \times \dots \times FCn}$$

Onde: FC representa os fatores de contaminação dos elementos poluentes já calculados; e n é o número de metais poluentes

São classificados os resultados: (PLI > 1) como poluído; e (PLI < 1) como não poluído.



Grau de Contaminação Modificado

O Grau Modificado de Contaminação (GCm) foi introduzido para estimar o grau geral de contaminação em um determinado local ou área, podendo ser calculado através do somatório dos fatores de contaminação dos metais considerados, divididos pelo número de metais poluentes considerados.

$$GCm = \frac{\sum_{i=1}^n FCI}{n}$$

Para a classificação e a descrição do Grau Modificado de Contaminação (GCm) no sedimento, a seguinte escala é proposta por Hakanson (1980):

$GCm < 1.5$: é nulo para um grau muito baixo de contaminação;

$1,5 \leq GCm < 2$: é um baixo grau de contaminação;

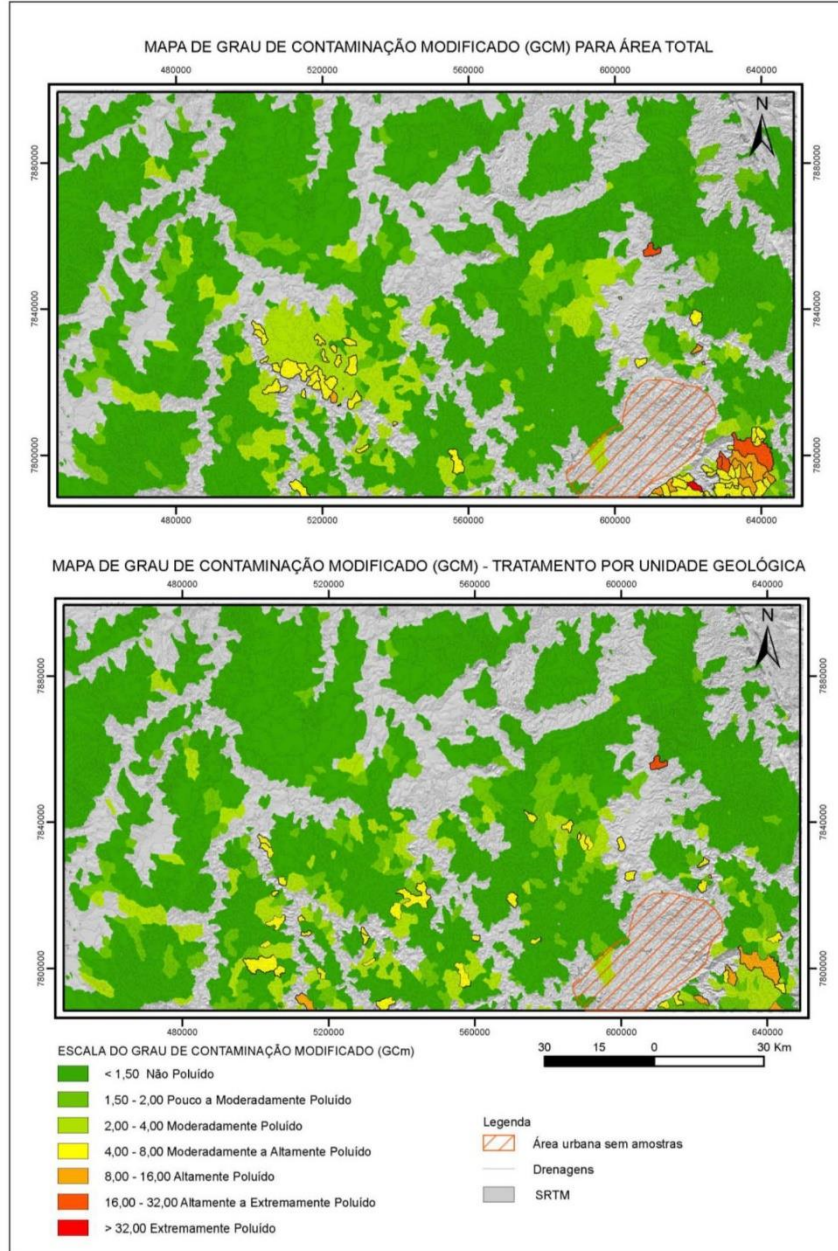
$2 \leq GCm < 4$: é um grau moderado de contaminação;

$4 \leq GCm < 8$: é um grau alto de contaminação;

$8 \leq GCm < 16$: é um muito alto grau de contaminação;

$16 \leq GCm < 32$: é um extremamente alto grau de contaminação;

$GCm \leq 32$: é um grau ultra-alto de Contaminação.



Risco Ecológico

O índice de Risco Ecológico potencial (RE) pode ser usado para avaliar as características e o comportamento ambiental de metais pesados contaminantes em sedimentos, indicando agentes contaminantes e locais de atenção prioritárias (HAKANSON, 1980).

O índice de Risco Ecológico potencial (RE) é calculado por:

$$RE = \sum_{i=1}^n T_r^i * FC_i$$

Onde: T_r é o fator de resposta à toxicidade de um determinado metal, tabelado fator de resposta tóxica, representando o potencial perigo de contaminação do metal pesado para indicar a toxicidade de cada metal pesado e a contaminação para o meio ambiente.

Os fatores de respostas tóxicas padronizadas para os elementos são: As (10), Cd (30), Co (5), Cr (2) Cu (5), Mo (5), Ni (5), Pb (5), U (2), Zn (1) (HAKANSON, 1980)

Para a classificação e a descrição do Risco Ecológico (RE), Doležalová Weissmannová *et al.* (2019) propõem a seguinte escala:

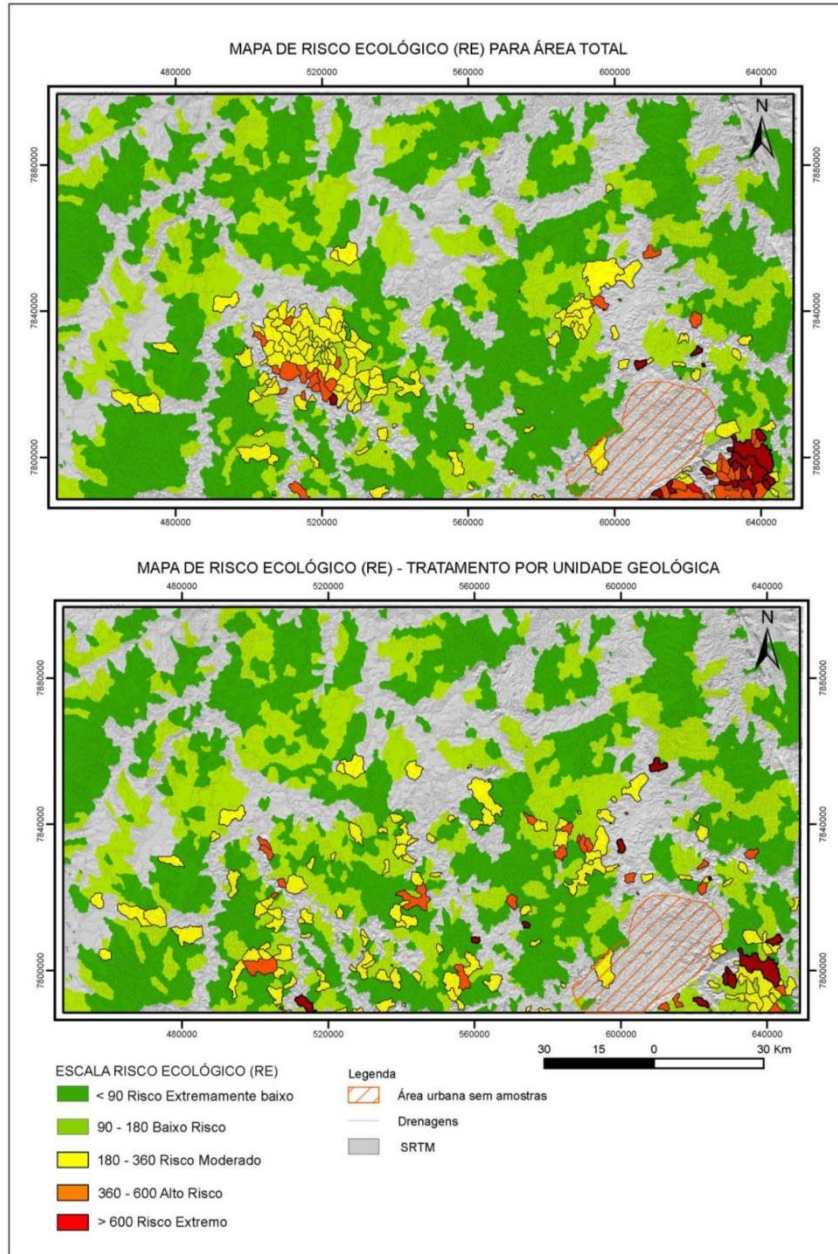
RE < 90: baixo risco ecológico;

90 > RE < 180: risco ecológico moderado;

180 > RE < 360: forte risco ecológico;

360 > RE < 600: risco ecológico muito forte;

RE > 600: risco ecológico muito forte.



▶ DISCUSSÃO DOS RESULTADOS

Os resultados obtidos dos valores de referência para os 21 elementos selecionados — elementos potencialmente tóxicos para os ecossistemas presentes na matriz sedimento de corrente, explorados através técnicas estatísticas comuns (estatística univariada), estatística bivariada e representação da distribuição espacial dos valores de referências a partir de técnicas cartográficas e do *software*, ArcGis —, permitem investigar o comportamento, as tendências e as associações dos elementos analisados, levando ao entendimento das anomalias geoquímicas que podem estar relacionadas aos processos geológicos, físicos naturais e antropogênicos.

Identificam-se faixas de concentração de *background* (entre limiares inferiores e superiores) representadas pelo valor mediano dos *boxplots*, considerando-se que determinados elementos possuem fontes distintas (sendo elas unidades geológicas distintas, diferentes processos hidrotermais, ou mesmo contaminação por fontes antrópicas). Desta forma, a concentração de *background* (ou mediana) de um elemento pode possuir valores distintos por unidade.

As distribuições das concentrações vistas nos mapas demonstram, para todos os elementos, uma clara afinidade litológica. Contudo, observam-se pontualmente valores

anômalos que podem estar associados com as atividades antropogênicas.

Ao se comparar os valores mediados com os valores da média crustal (UCC), verificamos, com algumas exceções, que os valores obtidos para a área de estudo são inferiores aos valores do UCC. Isto implica que a utilização desse parâmetro, utilizado mundialmente, pode levar a considerar uma área contaminada ou poluída como não poluída.

As faixas de *background* para os elementos As, Cd, Co, Cr, Cu, Fe, Ni, Mo, V, Zn, são mais representativas nas unidades do Supergrupo Rio das Velhas (RV), corroborada pelas mineralizações de Au carreados por fluidos hidrotermais juntamente com elementos como Ag, As, Sb, Pb e Zn, (BORBA, 2000). Tal fato pode, também, ser corroborado pelas afinidades geoquímicas entre esses elementos.

O tratamento em relação aos índices ambientais dos elementos — As, Cd, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, U e Zn, elementos de grande potencial de toxicidade obtidos pelo tratamento global dos dados — apresentou uma distribuição das anomalias por toda a área e, também, grandes concentrações anômalas em regiões mais específicas. Observa-se esse fenômeno para o FC, FE, RE, PLI e GCm.

Após a individualização dos dados por unidades geológicas, houve uma

mudança no comportamento das distribuições. Há uma tendência no valor médio para alguns metais relacionados à variabilidade litológica, tais como valores As, Mo, Hg, Cd e U; um enriquecimento médio nas unidades do grupo Rio das Velhas (RV) e do batólito Pequi e Serra dos Tavares (PST). Observamos um enriquecimento médio alto, também, para o Mo nas rochas graníticas gnáissicas da unidade Cláudio/Divinópolis (GCD); e As para as rochas graníticas gnáissicas do Complexo Belo Horizonte (CBH).

Verifica-se que, através do FE, os elementos que possuem maiores áreas e níveis de contaminação são o $Mo > As > Cd > Co > Ni > Hg > U > Cu > Zn > Pb$, e que esses níveis de contaminação são, na sua maioria, concentrados da porção sul da área. Assim sendo, estão muito relacionados com as rochas graníticas gnáissicas do embasamento cristalino e as rochas vulcanossedimentares (*greenstones belt*).

Os 10 elementos (As, Cd, Co, Cu, Hg, Mo, Ni, Pb, U e Zn) apresentaram contaminações com FC entre 3 e 6 (“altamente poluído”) e entre 1 e 3 (“moderadamente poluído”).

As associações naturais de alguns destes elementos ocorrem em: depósitos de sulfetos maciços (Ni-Co-Fe-Cu-Ag-PGE-Se-Te-As-S); filões lenticulares de sulfetos (Ni-Co-Fe-Cu-S); depósitos de urânio (U-Cu-Ag-

Co-Ni-As-V-Se-Au-Mo); e depósitos lateríticos residuais (Ni-Co-Fe-Mn-Cr) (REIMANN & CARITAT, 1998). São, também, comumente encontradas nas rochas vulcanossedimentares (RV e Fazenda Tabera/Bateias (TABA)).

O Ni, U, Zn, Cu, Hg, ocorrem preferencialmente na porção sul da área de estudo; já o Hg, apresenta contaminações pontuais na porção centro-leste.

O Índice de Poluição (PLI) representa o número de vezes pelo qual a concentração do metal pesado no sedimento ultrapassou o valor de referência (*background*), e indica o nível geral de metal pesado poluente em uma amostra (SIVAKUMAR *et al.*, 2016).

O cálculo do PLI realizado por unidades geológicas mostra-se com uma maior dispersão e diluição das áreas contaminadas; contudo, observa-se que em ambos os tratamentos a área de estudo encontra-se com um elevado grau de contaminação, sejam elas de fundo geogênico ou de natureza antropogênica. Apesar da região de maior uso e ocupação ficar na região centro-sul da área de estudo, esse índice de contaminação ocorre de forma generalizada.

O Grau Modificado de Contaminação (GCm) foi introduzido para estimar o grau geral de contaminação em um determinado local ou área, calculado através do somatório dos fatores de contaminação dos metais

considerados, divididos pelo número de metais poluentes apontados.

Os valores obtidos através dos parâmetros do estado de poluição do fator de contaminação modificado (GCm) para área total mostra, de forma geral, a área de estudo não poluída ($< 1,50$). No extremo SE da área, observamos níveis de contaminação que variam de 4 a 8 (“moderadamente a altamente poluído”), até valores > 32 (“extremamente poluído”). Na região centro-sul, também observamos valores que indicam uma região com valores que variam de 2 a 4 (“moderadamente poluído”) até valores de 4 a 8 (“moderadamente a altamente poluído”).

Essas regiões anômalas indicam uma origem geogênica relacionada com as rochas máficas e ultramáficas do RV e TABA.

Após a individualização dos dados por unidades geológicas, observamos que as regiões da área de estudo que apresentaram valores maiores de contaminação passaram a apresentar valores de contaminações no máximo de 8 a 16 (“altamente poluído”), o que ocorreu devido aos valores de referência da região serem naturalmente mais elevados quando se comparados aos valores medianos globais.

O RE, após a individualização dos dados por unidades geológicas de forma semelhante ao GCm, traz uma distribuição diluída de anomalias menor — essa diluição do nível de contaminação ocorreu devido aos valores de

referência da região serem naturalmente mais elevados quando se comparados aos valores medianos da área total.

▶ CONCLUSÃO

Após a exposição dos resultados, foi evidenciado que diversas regiões da área de estudo mostram resultados com concentrações dos 21 elementos químicos analisados, apresentando concentrações elevadas ou acima dos parâmetros legais definidos pelas legislações vigentes atuais — sejam elas estaduais, federais ou até mesmo valores de referências internacionais utilizados com frequência.

Verifica-se que o estabelecimento de valores de referência (*background*) para elementos-traço tem fundamental importância não somente na pesquisa mineral, mas em estudos ambientais, pois se faz de grande relevância para balizar as decisões de controle e mitigação de áreas, principalmente quando relacionados a áreas contaminadas que venham trazer riscos potenciais à saúde e a todo o ecossistema relacionado.

Atualmente, a principal legislação utilizada para controle e fiscalização é a Resolução CONAMA N°454/2012. Esta resolução se baseia, principalmente, no guia de qualidade dos sedimentos canadenses. Os

resultados deste estudo demonstram as discrepâncias dos valores médios da região e quanto importante é estabelecer parâmetros de referências levando em consideração a variabilidade local.

A utilização inadequada, ou o uso de valores de referência sem levar em consideração a variabilidade local, podem induzir a interdição ou a remediação de áreas naturalmente enriquecidas de determinados elementos, levando a perdas de recursos (financeiro e/ou econômico). Por outro lado, podem enquadrar regiões contaminadas como regiões sem riscos potenciais à saúde e à vida. Os índices ambientais são importantes ferramentas de controle e mitigação de regiões contaminadas.

O Índice de Poluição (PLI) indica uma grande quantidade de regiões

consideradas poluídas em, pelo menos, um poluente.

O Grau Modificado de Contaminação (GCm) mostra-se com contaminações naturais relacionadas à geologia a sudeste da área, bem como uma microbacia altamente poluída que não se verificou a correspondência com os litotipos e não evidenciou informações que corroborem a contaminação antrópica devido a não presença de indústrias ou outro tipo de atividade registrada. No geral, a área (através deste método) apresenta-se em sua maioria não poluída.

O Risco Ecológico (RE), assim como os demais métodos utilizados neste trabalho, mostra valores elevados, principalmente no extremo sudeste da área, associados às rochas vulcano-sedimentares.

REFERÊNCIAS

- ALBANESE, S.; VIVO B. de; LIMA A.; CICCHELLA D. Geochemical *background* and baseline values of toxic elements in stream sediments of Campania region (Italy). **Journal of Geochemical Exploration**, v. 93, n. 1, p. 21-34, 2007.
- ALKMIM, F. F. de. O que faz de um cráton um cráton? O Cráton do São Francisco e as revelações almeidianas ao delimitá-lo. **Geologia do continente sul-americano: evolução da obra de Fernando Flávio Marques de Almeida**, p. 17-34, 2004.
- ALKMIM, F. F.; BRITO NEVES, B. B.; CASTRO ALVES, J. A. Arcabouço estrutural do Cráton do São Francisco. **O Cráton do São Francisco. Sociedade Brasileira de Geologia, Salvador, Brazil**, p. 45-62, 1993.
- ALMEIDA F. F. M. de. O Cráton do São Francisco. *Revista Brasileira de Geociências*, 7: 349-364, 1977.
- CARITAT P. & COOPER M. A continental-scale geochemical atlas for resource exploration and environmental management: The National Geochemical Survey of Australia, 2016.
- CARITAT P. *et al.* Regional distribution of Al, B, Ba, Ca, K, La, Mg, Mn, Na, P, Rb, Si, Sr, Th, U and Y in terrestrial moss within a 188,000 km² area of the central Barents region: influence of geology, seaspray and human activity. **Applied Geochemistry**, v. 16, n. 2, p. 137-159, 2001.
- CARRANZA E. J. M. Geochemical anomaly and mineral prospectivity mapping in GIS. Handbook of Exploration and Environmental Geochemistry, Vol. 11, M. Hale (Series Editor), 2009.
- CARRANZA E. J. M. Geochemical sampling for geological–environmental studies. **Journal of geochemical exploration**, v. 111, n. 3, p. 57-58, 2011.
- CHENG Q. MULTIFRACTAL theory and geochemical element distribution pattern. *Earth Science-Journal of China University of Geosciences* 25 (3), p.311–318, 2000.
- CHENG Q. Spatial and scaling modelling for geochemical anomaly separation. *J. Geochem. Explor.* 65, 175–194, 1999.
- CHENG Q. The perimeter–area fractal model and its application in geology. *Math. Geol.* 27, p. 69–82, 1995.
- CONAMA, Resolução. Conselho Nacional do Meio Ambiente-CONAMA, Resolução N°454, 01 de novembro de 2012. Ministério do Meio Ambiente, Brasília, 2012. Disponível em: http://conama.mma.gov.br/?option=com_sisconama&task=arquivo.download&id=667. Acesso em 05 jun. 2022.
- COPAM, Deliberação Normativa. Conselho Estadual De Política Ambiental – COPAM/CERH n° 02, de 08 de setembro de 2010. D. E. – “Minas Gerais”, Belo Horizonte, 2010.

COPAM, Resolução. Conselho Estadual De Política Ambiental – COPAM, Resolução N° 166, de 29 de junho de 2011. Diário do Executivo de Minas Gerais, Belo Horizonte, 2011. Disponível em: <http://www.siam.mg.gov.br/sla/download.pdf?idNorma=18414>. Acesso em 05 jun. 2022.

DARNLEY, A. G. *et al.* A global geochemical database for environmental and resource management: recommendations for International Geochemical Mapping, final report of IGCP Project 259, 2005.

DAVIS, P. A.; KOZAK, R. C.; SCHABER, G. G. (1986). Global radar units on Venus derived from statistical analysis of Pioneer Venus Orbiter radar data. **Journal of Geophysical Research: Solid Earth**, v. 91, n. B5, p. 4979-4992, 1986.

DOLEŽALOVÁ WEISSMANNOVÁ, H. *et al.* Potential ecological risk and human health risk assessment of heavy metal pollution in industrial affected soils by coal mining and metallurgy in Ostrava, Czech Republic. **International journal of environmental research and public health**, v. 16, n. 22, p. 4495, 2019.

FILZMOSER, P.; HRON, K.; REIMANN, C. Principal component analysis for compositional data with *outliers*. **Environmetrics: The Official Journal of the International Environmetrics Society**, v. 20, n. 6, p. 621-632, 2009.

FJP, Indicadores Econômicos, 23. Fundação João Pinheiro - FJP. Diretoria de Estatística e Informações. Produto interno bruto dos municípios de Minas Gerais: ano de referência 2017. Belo Horizonte, 2019. Disponível em: <https://fjp.mg.gov.br/wp-content/uploads/2020/02/Estatistica-Info-macoes-23-PIB-dos-municipios.pdf>. Acesso em: 23 fev. 2023.

FJP, Indicadores Econômicos, 45. Fundação João Pinheiro - FJP. Diretoria de Estatística e Informações Produto Interno Bruto dos municípios de Minas Gerais: ano de referência 2019. Belo Horizonte, 2022. Disponível em: https://fjp.mg.gov.br/wp-content/uploads/2021/10/13.01_Serie-Estatistica-Info-macoes-Produto-Interno-Bruto-dos-Municipios-2019_com-capa.pdf. Acesso em: 23 fev. 2023.

GALUSZKA A. A review of geochemical *background* concepts and an example using data from Poland. **Environmental geology**, v. 52, n. 5, p. 861-870, 2007a.

GASPARON, M. *et al.* The freshwater lakes of the Larsemann Hills, East Antarctica: chemical characteristics of the water column, 2002.

GRUNSKY, E. C. The interpretation of geochemical survey data. **Geochemistry: Exploration, Environment, Analysis**, v. 10, n. 1, p. 27-74, 2010.

HAKANSON, L. An ecological risk index for aquatic pollution control. A sedimentological approach. **Water research**, v. 14, n. 8, p. 975-1001, 1980.

KAMANI, H. *et al.* Heavy metal contamination in street dusts with various land uses in Zahedan, Iran. **Bulletin of environmental contamination and toxicology**, v. 94, p. 382-386, 2015.

LAPWORTH, D. J. *et al.* Geochemical mapping using stream sediments in west-central Nigeria: implications for environmental studies and mineral exploration in West Africa. **Applied Geochemistry**, v. 27, n. 6, p. 1035-1052, 2012.

- LATRILLE, C. et. al. Physical speciation of trace metals in Fe -Mn concretions from a rendzic lithosol developed on Sinemurian limestones (France). *Geoderma*, 127e146, 2001.
- LICHT O. A. B. Multiscale, multimedia and multi-element geochemical mapping of the State of Paraná, Brazil, 2018.
- LIN, J., CHEN, S. The relationship between adsorption of heavy metal and OM in river sediments. *Environ. Int.*, 345e352, 1998.
- MANLY, B. FJ; MCALEVEY, L.; STEVENS, D. A randomization procedure for comparing group means on multiple measurements. **British Journal of Mathematical and Statistical Psychology**, v. 39, n. 2, p. 183-189, 1986.
- MARQUES, E.D. Geoquímica, p. 95-106, 2010 disponível em: TULLER, MANOEL PEDRO, et al. **Projeto Sete Lagoas-Abaeté**, CPRM, 2010.
- MARSHAK, S.; ALKMIM, F. F. Proterozoic contraction/extension tectonics of the southern São Francisco region, Minas Gerais, Brazil. **Tectonics**, v. 8, n. 3, p. 555-571, 1989.
- PEDROSA-SOARES, A. C. et al. Toward a new tectonic model for the late proterozoic Araçuaí (SE Brazil)-West Congolian (SW Africa) belt. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 6, n. 1-2, p. 33-47, 1992.
- PFLUG, R. A geologia da parte meridional da Serra do Espinhaço e zonas adjacentes, Minas Gerais. **Boletim DNP/ DGM**, n.226, Rio de Janeiro, 1965. 55p
- PFLUG, R. Observações sobre a estratigrafia da Série Minas na região de Diamantina, Minas Gerais. **DNP/ DGM, Not. Prel. Est.** 142:1-20, Rio de Janeiro, 1968
- PFLUG, R.; RINGER F. Estratigrafia e evolução geológica da margem sudeste do Cráton Sanfranciscano. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 27, 1973, Aracaju. Anais... Aracaju: Sociedade Brasileira de Geologia, 1973. v.2, p.5-19.
- PINHO, J. M. M. et al. Geologia e recursos minerais das folhas: Cabeceira Grande, Unai, Ribeirão Arrojado, Serra da Aldeia, Serra da Tiririca, Paracatu, Guarda-Mor, Arrenegado, Coromandel, Lagamar, Monte Carmelo e Patos de Minas. Projeto Vazante-Paracatu, 2017.
- PINHO, J.M.M. et al. Definição semiquantitativa dos domínios estruturais do Grupo Bambuí, na região centro-sul de MG In: CONGRESSO CPRM - Programa Geologia do Brasil 150 BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 44, 2008, Curitiba, Anais... Curitiba: Sociedade Brasileira de Geologia, CD, 2008.
- PINHO, J.M.M.; RIBEIRO, J.H.; TULLER, M.P.; FÉBOLI, W.L.; SIGNORELLI, N. Arcabouço estrutural do Grupo Bambuí na região sudeste do Cráton do São Francisco. In: CONGRESSO BRASILEIRO DE GEOLOGIA, 43, 2006, Aracajú, Anais... Aracajú: Sociedade Brasileira de Geologia, v.1, p.111, 2006.
- REIMANN C. & CARITAT P. Establishing geochemical *background* variation and threshold values for 59 elements in Australian surface soil. **Science of the Total Environment**, v. 578, p. 633-648, 2017.
- REIMANN C. & CARITAT, P. Distinguishing between natural and anthropogenic sources for elements in the environment: Regional geochemical surveys versus enrichment factors. **Science of the Total Environment**, v.337, p. 91-107, 2005

REIMANN C. *et al.* GEMAS: Establishing geochemical *background* and threshold for 53 chemical elements in European agricultural soil. **Applied Geochemistry**, v. 88, p.302–318, 2018.

REIMANN C. *et al.* **Statistical Data Analysis Explained: Applied Environmental Statistics with R**. John Wiley & Sons, 2008.

REIMANN C.; FILZMOSER P.; GARRETT R.G. Factor analysis applied to regional geochemical data: problems and possibilities. **Applied Geochemistry**, v.17, p. 185–206, 2002.

RIBEIRO J.H.; TULLER, M.P.; DANDERFER FILHO, A. Mapeamento geológico da região de Sete Lagoas, Pedro Leopoldo, Matozinhos, Lagoa Santa, Vespasiano, Capim Branco, Prudente de Moraes, Confins e Funilândia, Minas Gerais (escala 1:50.000) – Texto Explicativo. In: Projeto Vida. Belo Horizonte: CPRM, 1991. (versão CD-ROM, 2003)

ROMANO, A.W. Folha Pará de Minas, SE.23-Z-C-IV: texto e mapa. Programa Geologia do Brasil – PGB. Belo Horizonte: CPRM/UFMG, 2007. 1 CD-ROM.

SAHOO, P. K *et al.* Regional-scale mapping for determining geochemical *background* values in soils of the Itacaiúnas River Basin, Brazil: The use of compositional data analysis (CoDA). **Geoderma**, v. 376, p.114504, 2020b.

SAHOO, P. K *et al.* Source and *background* threshold values of potentially toxic elements in soils by multivariate statistics and GIS-based mapping: a high density sampling survey in the Parauapebas basin, Brazilian Amazon. **Environmental geochemistry and health**, v. 42, n. 1, p. 255-282, 2020.

SALOMÃO, G. N. *et al.* Geochemical distribution and threshold values determination of heavy metals in stream water in the sub-basins of Vermelho and Sororó rivers, Itacaiúnas River watershed, Eastern Amazon, Brazil. **Geochimica Brasiliensis**, v.32: p. 180–198, 2018.

SALOMÃO, G. N. *et al.* Geochemical mapping and *background* concentrations of iron and potentially toxic elements in active stream sediments from Carajás, Brazil – implication for risk assessment. **Journal of South American Earth Sciences**, v.92, p.151–166, 2019b.

SALOMÃO, G. N. *et al.* Geochemical mapping and estimation of *background* concentrations in soils of Carajás mineral province, eastern Amazonian Craton, Brazil. **Geochemistry: exploration, environment, analysis**, v. 19, n. 4, p. 431-447, 2019a.

SALOMÃO, G. N. *et al.* Geochemical mapping in stream sediments of the Carajás Mineral Province: *Background* values for the Itacaiúnas River watershed, Brazil. **Applied geochemistry**, v.118, p.104608, 2020.

SILVA L. F. F. *et al.* Mercury accumulation in sediments of a mangrove ecosystem in SE Brazil. **Water, Air, and Soil Pollution**, v. 145, n. 1, p. 67-77, 2003.

SILVA-FILHO, E. V. *et al.* Distribution of trace metals in stream sediments along the Trans-Amazonian Federal Highway, Pará State, Brazil. **Journal of South American Earth Sciences**, v. 54, p. 182-195, 2014.

SIVAKUMAR, S. *et al.* Assessment of heavy metal enrichment and the degree of contamination in coastal sediment from South East Coast of Tamilnadu, India. **Journal of Heavy Metal Toxicity and Diseases**, v. 1, n. 2, p. 1-8, 2016.

SOARES M. C. C. Avaliação Geoambiental da Bacia Hidrográfica do Arroio do Salso, Porto Alegre – RS. Dissertação de Mestrado. 100p. Instituto de Geociências, Universidade Federal do Rio Grande do Sul, Porto Alegre, Rio Grande do Sul, 2002.

TABACHNICK, B. G.; FIDELL, L. S. Using multivariate statistics., 4th edn.(Allyn & Bacon: Needham Heights, MA), 2001.

UHLEIN, A. **Transição cráton-faixa dobrada: exemplo do Cráton do São Francisco e da Faixa Aracuai (ciclo brasileiro) no estado de Minas Gerais: aspectos estratigráficos e estruturais.** Tese de Doutorado. Universidade de São Paulo, 1991.

UHLEIN, A.; EGYDIO-SILVA, M.; TROMPETTE, R. Faixa de dobramentos Aracuai no estado de Minas Gerais: uma cadeia monocíclica de idade brasileira. *Anais*, v. 6, p. 2576-2588, 1990.

VICQ, R. *et al.* Iron Quadrangle, stream sediments, Brazil: geochemical maps and reference values. *Environmental Earth Sciences*, v. 74, n. 5, p. 4407-4417, 2015.

YUANG L. *et al.* Environmental geochemical mapping and multivariate geostatistical analysis of heavy metals in topsoils of a closed steel smelter: Capital Iron & Steel Factory, Beijing, China. *Journal of Geochemical Exploration*, v.130, p.15–21, 2013.

ANEXOS

